

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Resistência ao Cisalhamento Iosipescu do
Compósito Laminado Reforçado com Tecido
de Fibras de Vidro/Epóxi**

Autor: **Emerson Bonafé Souza**

Orientador: **Prof. Dr. José Célio Dias**

Itajubá, Abril de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Resistência ao Cisalhamento Iosipescu do
Compósito Laminado Reforçado com Tecido
de Fibras de Vidro/Epóxi**

Autor: Emerson Bonafé Souza

Orientador: Prof. Dr. José Célio Dias

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Abril de 2006

M.G. – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Resistência ao Cisalhamento Iosipescu do
Compósito Laminado Reforçado com Tecido
de Fibras de Vidro/Epóxi**

Autor: **Emerson Bonafé Souza**

Orientador: **Prof. Dr. José Célio Dias**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho – UNESP/FEG

Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr. – UNIFEI/IEM

Prof. Dr. José Célio Dias – UNIFEI/Orientador

Dedicatória

*À minha família pelo amor carinho
e a minha namorada
Karina Moutinho de Oliveira*

Agradecimentos

Ao meu Orientador, Prof. Dr. José Célio Dias, pela competência, dedicação, paciência e amizade.

Ao Prof. Dr. Luis Cláudio Pardini – Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço (AMR/IAE) pela doação da lâmina – vidro/epóxi de 8 camadas.

Ao funcionário João Carlos, pela colaboração nos ensaios em condições de ruptura e amizade.

Aos funcionários dos laboratórios de engenharia mecânica da UNIFEI.

Aos amigos pelo permanente incentivo, colaboração, amizade, momentos de lazer e inesquecível convívio profissional.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

A CAPES, através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

À minha família, que sempre me incentivou na formação e no desenvolvimento cultural.

*“Embora ninguém possa voltar atrás e
fazer um novo começo, qualquer um pode
começar agora e fazer um novo fim”.*

Resumo

SOUZA, E. B. (2005), *Resistência ao Cisalhamento Iosipescu do Compósito Reforçado com Tecido de Fibras de Vidro/Epóxi*, Itajubá, 75p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Este trabalho apresenta o estudo da resistência ao cisalhamento do compósito laminado reforçado com fibras de vidro/epóxi, contendo 8 camadas. Os compósitos poliméricos reforçados são conhecidos por sua excelente combinação de alta rigidez estrutural e baixo peso. Sua inerente anisotropia permite ao projetista fabricar o material para alcançar as exigências de desempenho desejadas. Desta forma, é de fundamental importância que o projetista disponha de ferramentas que possibilitem dimensionar a peça a ser fabricada considerando-se os requisitos estruturais, características funcionais e restrições impostas pelo processo de fabricação. Dentro dessas exigências considera-se, para este trabalho o compósito reforçado vidro/epóxi. Para este fim, as amostras apresentavam um entalhe em V e partir dos resultados obtidos experimentalmente, buscou-se verificar a influência da seqüência de empilhamento das lâminas e as orientações das fibras. Finalizando, o trabalho propõe um ciclo de desenvolvimento de projeto para estes componentes integrando procedimentos teóricos e experimentais visando à otimização do projeto do componente com maior rapidez e confiabilidade. As amostras ensaiadas em condições de regime elástico e de ruptura, apresentaram valores de tensão e módulo de cisalhamento maior para amostras com orientação de fibras com ângulo de 45° e as amostras com 0° e 90° apresentaram valores inferiores, devido ao grau de anisotropia do material.

Palavras-chave

Compósito, Orientação das Fibras, Otimização do Projeto, Polímero Reforçado.

Abstract

SOUZA, E. B. (2005), Iosipescu Shear Behaviour of epoxy-reinforced Glass Fiber Textile Composites, Itajubá, 75p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

This work studies the shear resistance of the composite reinforced with glass/epoxy fibers of 8 layers. The composite materials are recognized by their excellent combination of high structural stiffness and low weight. Their inherent anisotropy allows the designer to tailor the material in order to achieve the desired performance requirements. Thus, it is very important to develop tools in order to allow the designer to obtain optimized designs considering the structural requirements, functional characteristics and restrictions imposed by the manufacturing process. Within these requirements, this work considers the components manufactured from polymer reinforced materials (epoxy and glass fiber). To this finality, the beams presented incision in V and the results, the influence of the fibers orientation as well as the stacking sequences was investigated. Finally, it was proposed a design cycle which integrates experimental and theoretical procedures in order to get optimized designs in a faster and reliable way. The samples assayed in elastic regimen conditions and rupture, had presented tension and module values of high shear for samples with fibre orientation with angle 45° and the samples with 0° e 90° had presented low values, due to the degree of anisotropy of the material.

Keywords

Composite, Fibers Orientation, Design Optimization, Polymer Reinforced.

Sumário

SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	V
SIMBOLOGIA	VI
LETRAS LATINAS	VI
LETRAS GREGAS	VII
SUBSCRITOS	VII
ABREVIATURAS	VIII
SIGLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
ESTADO DA ARTE	1
1.1 Revisão Bibliográfica -----	1
1.2 Motivação do Trabalho-----	10
1.3 Objetivo da Pesquisa-----	12
1.4 Conteúdo -----	12
CAPÍTULO 2	13
PROPRIEDADES DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	13
2.1 Conceitos Básicos -----	13
2.2 Matrizes e Fibras-----	15
2.3 Propriedades Elásticas-----	18
2.4 Requisitos de Projeto -----	19
CAPÍTULO 3	23
MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	23
3.1 Amostras-----	23
3.2 Descrição do dispositivo-----	26
3.3 Procedimentos de Ensaio -----	33

3.4 Equipamentos Utilizados no laboratório -----	37
CAPÍTULO 4 _____	39
ANÁLISE DOS RESULTADOS _____	39
4.1 Teste de Cisalhamento no Plano -----	39
4.2 Análise das Deformações Especificas em Condições de Regime Elástica -----	41
4.3 Análise das Propriedades Mecânicas em Condições de Ruptura -----	51
4.4 Modos de Falha do Compósito -----	57
CAPÍTULO 5 _____	62
CONCLUSÕES E SUGESTÕES _____	62
5.1 Conclusão-----	62
5.2 Contribuições-----	64
5.3 Sugestões -----	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	66
APÊNDICE A _____	70
APÊNDICE B _____	73

Lista de Figuras

Figura 1 – Sensores montados no centro da amostra a 45° -----	3
Figura 2 – Teste de Iosipescu modificado -----	3
Figura 3 – Variação da tensão de cisalhamento-----	4
Figura 4 – Teste de Iosipescu e Teste AFPB-----	5
Figura 5 – Típicas fraturas de amostras com dois e quatro entalhes-----	5
Figura 6 – Círculo das tensões de Mohr-----	6
Figura 7 – Compósito vidro/epóxi de 8 camadas -----	24
Figura 8 – Amostra da malha com a direção urdume -----	24
Figura 9 – Disposição das amostras -----	25
Figura 10 – Processo de corte inicial das amostras -----	26
Figura 11 – Esquema do dispositivo de ensaio e amostra típica -----	27
Figura 12 – Esquema de aplicação de cargas em amostras no teste Iosipescu-----	27
Figura 13a – Esquema de geometria de apoios-----	29
Figura 13b – Esquema de geometria de apoios-----	29
Figura 14 – Teste de cisalhamento IST e HIST-----	30
Figura 15 – P em função de Q -----	30
Figura 16 – τ em função de γ -----	32
Figura 17 – Transdutor de deformação -----	33
Figura 18 - Processo de calibração antes dos ensaios nas amostras -----	34
Figura 19 – Montagem da ponte da completa utilizando duas amostras -----	34
Figura 20 – Amostras no dispositivo para o teste de Iosipescu -----	35
Figura 21 – Amostra submetida ao esforço de carregamento -----	35
Figura 22 – Equipamento utilizado para os ensaios das amostras -----	37
Figura 23 – Máquina universal de ensaios EMIC -----	38
Figura 24 – Nomenclatura utilizada no conjunto de amostras A -----	40
Figura 25 – Tempo em função da deformação específica para a amostra A1 -----	41
Figura 26 – Tempo em função da deformação específica para a amostra A2 -----	42

Figura 27 – Tempo em função da deformação específica para a amostra A3 -----	42
Figura 28 – Tempo em função da deformação específica para a amostra A4 -----	43
Figura 29 – $\varepsilon_m/\varepsilon_0$ em função de τ_0 para a amostra A1-----	44
Figura 30 – $\varepsilon_m/\varepsilon_0$ em função de τ_0 para a amostra A2 -----	44
Figura 31 – $\varepsilon_m/\varepsilon_0$ em função de τ_0 para a amostra A3 -----	45
Figura 32 – $\varepsilon_m/\varepsilon_0$ em função de τ_0 para a amostra A4 -----	45
Figura 33 – τ_0 em função γ/γ_0 para carga na amostra A1-----	46
Figura 34 – τ_0 em função γ/γ_0 para descarga na amostra A1 -----	46
Figura 35 – τ_0 em função γ/γ_0 para carga na amostra A2 -----	47
Figura 36 – τ_0 em função γ/γ_0 para descarga na amostra A2 -----	47
Figura 37 – τ_0 em função γ/γ_0 para carga na amostra A3 -----	47
Figura 38 – τ_0 em função γ/γ_0 para descarga na amostra A3 -----	48
Figura 39 – τ_0 em função γ/γ_0 para carga na amostra A4 -----	48
Figura 40 – τ_0 em função γ/γ_0 para descarga na amostra A4 -----	48
Figura 41 – Módulo de cisalhamento G_{RT} em função do ângulo θ -----	50
Figura 42 – Força em função do deslocamento para a amostra A1 -----	51
Figura 43 – Força em função do deslocamento para a amostra A2 -----	52
Figura 44a – Força em função do deslocamento para a amostra A3 -----	52
Figura 44b – Tempo em função da deformação específica para a amostra A3 -----	53
Figura 45a – Força em função do deslocamento para a amostra A4 -----	53
Figura 45b – Tempo em função da deformação específica para a amostra A4 -----	54
Figura 46 – Tensão de cisalhamento até a ruptura em função dos ângulos -----	55
Figura 47 – Faces laterais da amostra A1 -----	57
Figura 48 – Faces de apoio da amostra A1 -----	58
Figura 49 – Faces laterais da amostra A2 -----	58
Figura 50 – Faces de apoio da amostra A2 -----	58
Figura 51 – Faces laterais da amostra A3 -----	59
Figura 52 – Faces de apoio da amostra A3 -----	60
Figura 53 – Faces laterais da amostra A4 -----	60
Figura 54 – Faces de apoio da amostra A4 -----	60
Figura 55 – Critério de falha de Mohr -----	61

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores de referência P_1 , P_2 , P e Q em função de a/b -----	28
Tabela 2 – Numeração das amostras e orientações -----	36
Tabela 3 – Módulo de cisalhamento sem e com o fator de correção -----	49
Tabela 4 – Tensão de cisalhamento para as diferentes orientações das amostras -----	55
Tabela 5 – Valores de τ e G encontrados na literatura e nos ensaios nas amostras -----	56

Simbologia

Letras Latinas

A-B	Seção perpendicular ao entalhe V
a/b	Relação da distância entre os pontos de carga
a	Distância de aplicação da força P_1
b	Distância de aplicação da força P_2
Q	Carga externa aplicada
P_1	Carga aplicada
P_2	Carga de reação
h	Altura entre os pontos A e B da amostra
t	Espessura da amostra
C	Fator de correção
G	Módulo de cisalhamento
A1, B1, C1	Amostras com orientação urdume
A2, B2, C2	Amostras com orientação trama
A3, B3, C3	Amostras a 45° a partir da orientação trama
A4, B4, C4	Amostras a 45° a partir da orientação urdume
b	Largura da viga de aço
h	Altura da viga de aço
L	Comprimento do ponto de aplicação da carga
E	Módulo de Young
E_a	Módulo de armazenagem
E_p	Módulo de perda

Letras Gregas

α	Valores dos ângulos de entalhe
β	Posicionamento de montagem dos sensores na amostra
σ_1	Tensão principal no plano
σ_2	Tensão principal no plano
τ	Tensão de cisalhamento
ξ	Deformação específica
γ	Deformação angular
σ	Tensão normal
θ	Ângulo da direção das fibras nas amostras
δ	Fator de perda

Subscritos

R	Sentido da aplicação da carga
T	Carga aplicada que causa tração

Abreviaturas

IST Teste de Iosipescu convencional

HIST Teste de Iosipescu modificado

AFPB Asymetric Four Point Bending

Siglas

IEM Instituto de Engenharia Mecânica

ASTM International – Standards Worldwide

Capítulo 1

ESTADO DA ARTE

1.1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Esta pesquisa tem como objetivo principal o estudo da resistência ao cisalhamento do compósito laminado reforçado com fibras de vidro/epoxi obtido a partir de 8 camadas. Este desenvolvimento com enfoque experimental utiliza o teste de Iosipescu, também denominada viga com entalhe em V, para obter a resistência e o módulo de cisalhamento do compósito. Estas propriedades mecânicas variam com as orientações adotadas em relação ao entalhe em V. Por meio de sensores de deformações colados nas faces do compósito serão realizadas leituras de deformação específicas e conforme o procedimento de Iosipescu será determinada a tensão e o módulo de cisalhamento.

O teste de cisalhamento de Iosipescu foi projetado para medir a tensão de cisalhamento e módulo de elasticidade em metais e foi estendido a compósitos por WALRATH & ADAMS (1983).

Para DIAS (2004), o conhecimento das propriedades mecânicas, como resistência e módulo de cisalhamento, de materiais compósitos é fundamental para a utilização correta do material como elemento estrutural. Entretanto, o comportamento mecânico desses materiais obtidos em centros de pesquisas permanece uma atividade em constante desenvolvimento, devido o compósito ser governado não apenas pela geometria e tipo de carregamento, mas

também pelas propriedades mecânicas de seus constituintes. A combinação dos materiais é decidida de acordo com as necessidades da aplicação e a relativa importância de várias propriedades tais como: resistência à corrosão, rigidez, resistência à fadiga, expansão térmica, propriedades eletromagnéticas e isolamento acústico e estético. Contudo, a combinação dos materiais é decidida a partir de sua aplicação específica.

Para PIERRON & VAUTRIN (1994), os compósitos são materiais que combinam fibras e uma matriz ligante para maximizar o rendimento de uma propriedade específica, sendo que nenhum elemento se funde completamente ao outro. Como o desempenho já foi testado e aprovado, e as normas industriais relativas a estes materiais estão cada vez mais estabelecidas, aplicações usando materiais compósitos de matriz polimérica continuarão a aumentar. As elevadas resistência e rigidez específica continuam sendo a combinação que lança os materiais compósitos em novas áreas. No entanto, a grande capacidade de amortecimento e o baixo coeficiente de expansão térmica são características que podem ser adaptadas para aplicações específicas. Os compósitos avançados reduzem os problemas de fadiga e dão uma maior flexibilidade de concepção e fabricação, o que pode reduzir, significativamente, o número de peças fabricadas. Outras vantagens dos materiais compósitos são as resistências a temperaturas externas, corrosões e desgastes, especialmente em aplicações industriais. Estas características podem conduzir a custos mais baixos de ciclo de vida do produto.

Existem vários dispositivos para se medir as propriedades mecânicas ao cisalhamento de materiais compósitos, como o teste utilizando o disco Arcan e Teste de Iosipescu convencional e o modificado. Entre estes dispositivos, o Teste de Iosipescu é conhecido como o método da viga com o duplo entalhe em V com um ângulo α previamente escolhido, considerado preciso, por permitir uma tensão de cisalhamento quase uniforme próxima aos entalhes introduzidos na amostra, enquanto o teste Arcan permite realizar ensaios de cisalhamento puro, de tração ou uma combinação de esforços. Como principal desvantagem do teste de Iosipescu, pode ser citada a existência de reforços nas extremidades da amostra para fixação no dispositivo de ensaio, tamanho do corpo-de-prova, entalhe, etc. Normalmente, utilizam-se ensaios distintos para caracterização das propriedades mecânicas a tração e ao cisalhamento (PIERRON & VAUTRIN, 1994).

No teste de Iosipescu a avaliação da tensão de cisalhamento é obtida por meio da leitura de sinais de deformação em sensores montados no centro da amostra para $\beta = \pm 45^\circ$. As tensões de cisalhamento acontecem ao longo da linha A-B como apresentado na Figura 1 (PIERRON & VAUTRIN, 1994).

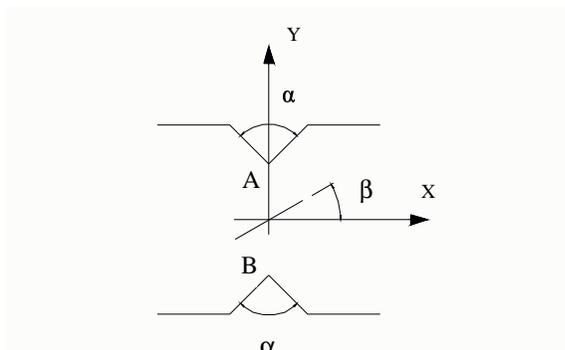


Figura 1 - Sensores montados no centro da amostra a 45°(HAWONG et al., 2004).

HAWONG et al. (2004), utilizaram amostras com 2 ângulos diferentes de entalhe, com $\alpha=90^\circ$ e $\alpha=110^\circ$, e 2 dispositivos diferentes o Teste de Iosipescu convencional (IST) e o Teste de Iosipescu modificado (HIST). Após os ensaios concluíram que o HIST se mostrou mais efetivo quando comparado ao IST como um dispositivo de cisalhamento puro. Além disso, é mais fácil e mais preciso aplicar as cargas na amostras de HIST, pois estas são aplicadas junto a linha neutra da viga (Figura 2). A partir deste trabalho concluíram ainda que, quando o ângulo do entalhe for $\alpha=90^\circ$, a distribuição de tensões no teste de Iosipescu convencional (IST) com uma relação $a/b=0,3$, é mais uniforme e quando o ângulo do entalhe for $\alpha=110^\circ$, a distribuição de tensão para o teste de Iosipescu modificado (HIST) com uma relação $a/b=0,3$, se torna mais uniforme. Sendo a e b as distâncias em relação ao entalhe em V, das cargas aplicadas na amostra entre os pontos de aplicação das forças.

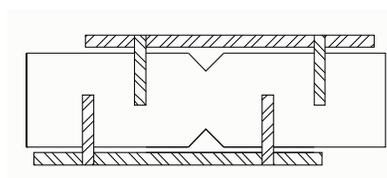


Figura 2 - Teste de Iosipescu modificado (HAWONG et al, 2004).

KHASHABA (2003) utilizou uma instalação para o Teste de Iosipescu para investigar as propriedades ao cisalhamento de lâminas planas cruzadas com diferentes ângulos de fibras. A laminação foi realizada utilizando a técnica do empilhamento com os seguintes ângulos $[0^\circ]$, $[15^\circ]$, $[30^\circ]$, $[45^\circ]$, $[60^\circ]$, $[75^\circ]$ e $[90^\circ]$.

As propriedades mecânicas foram determinadas experimentalmente. A partir dos resultados encontrados a máxima tensão de cisalhamento (τ_{xy}) ocorreu para as amostras com empilhamento a $[45^\circ]$ e $[60^\circ]$. Por outro lado às amostras com empilhamento a $[0^\circ]$ e $[90^\circ]$ apresentam tensão de cisalhamento mínima (Figura 3).

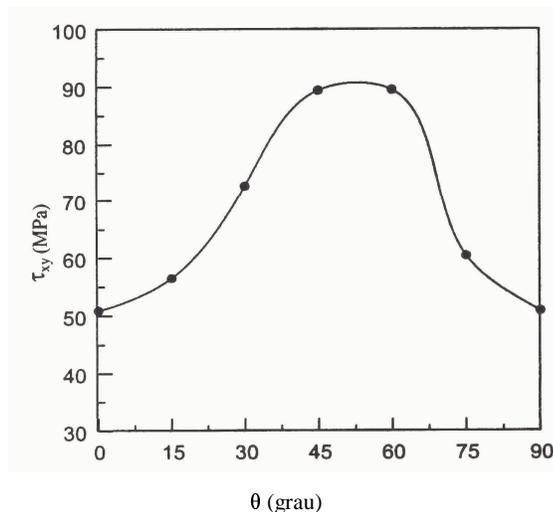


Figura 3 - Variação da tensão de cisalhamento em função do empilhamento das lâminas (KHASHABA, 2003).

Durante os ensaios para as diferentes famílias foi observado que as amostras apresentaram, inicialmente, um comportamento linear, seguido posteriormente de um comportamento não-linear. A tensão de cisalhamento no plano foi calculada com base na carga máxima observada na região linear. Devido à anisotropia desses materiais, as propriedades mecânicas dependem, fortemente, da seqüência de empilhamento (KHASHABA, 2003).

Amostras com orientações de fibra com $[0^\circ]$ e $[90^\circ]$ falharam devido a tensões de cisalhamento e ao puro estado de tensão ao longo das raízes dos entalhes, onde as trincas de cisalhamento são paralelas à direção do carregamento. Trincas em amostras com orientações de fibras com $[15^\circ]$, $[30^\circ]$, $[45^\circ]$ e $[75^\circ]$, foram iniciadas nas raízes dos entalhes e se propagaram ao longo das direções das fibras e com o aumento de carga mais trincas apareciam ao redor do entalhe, chegando a esmagar o material nos pontos de carregamento, devido à elevada concentração de tensão (KHASHABA, 2003).

Para HE et al. (2002), que estudaram as propriedades de cisalhamento no plano do compósito vidro/epoxi com orientações de fibra a $[0^\circ]$ e $[90^\circ]$, os resultados indicaram que uma trinca prematura na amostra pode acontecer dentro do entalhe devido à concentração de tensão causada pela existência da geometria e devido ao material ser descontínuo nas extremidades do entalhe.

TARNOPOL'S et al. (2000), estudaram a tensão e o módulo de cisalhamento em diversos materiais com combinações têxteis e com diferentes reforços de fibra e matriz. As propriedades de cisalhamento em combinações têxteis é um problema complexo devido à

falta da tensão de cisalhamento plano e a alta heterogeneidade estrutural do material. Foram utilizados o Teste de Iosipescu e o Teste AFPB (Asymmetric Four Point Bending) como mostrados na Figura 4.

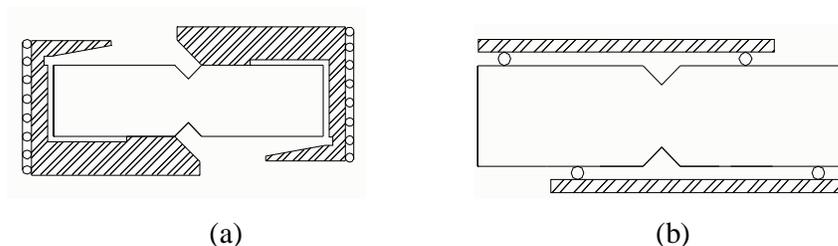


Figura 4 - Teste de Iosipescu (a) e Teste AFPB (b) (TARNOPOL'S et al, 2000).

Essas combinações têxteis possuem elevada resistência à fratura apresentando a possibilidade para resistir a uma tensão mecânica e térmica, devido a sua baixa anisotropia e pelas propriedades de tensão são menos sensíveis aos tamanhos e formas dos entalhes. O propósito foi calcular a aplicabilidade dos Testes de Iosipescu e do AFPB para a determinação das características de cisalhamento para combinações têxteis (TARNOPOL'S et al., 2000).

Modos de falha que são características de amostras com 2 e 4 entalhes no Teste de Iosipescu são mostrados na Figura 5. Amostras com 2 entalhes não falharam ao longo da seção entalhada, mas apareceram trincas que começam na raiz do entalhe e se propagaram no plano da tensão de tração principal. Para 4 entalhes as falhas ocorreram, praticamente, de forma instantânea e resultaram na separação completa das amostras, devido aos 2 entalhes extras. Nos Testes AFPB a falha foi semelhante nas amostras.

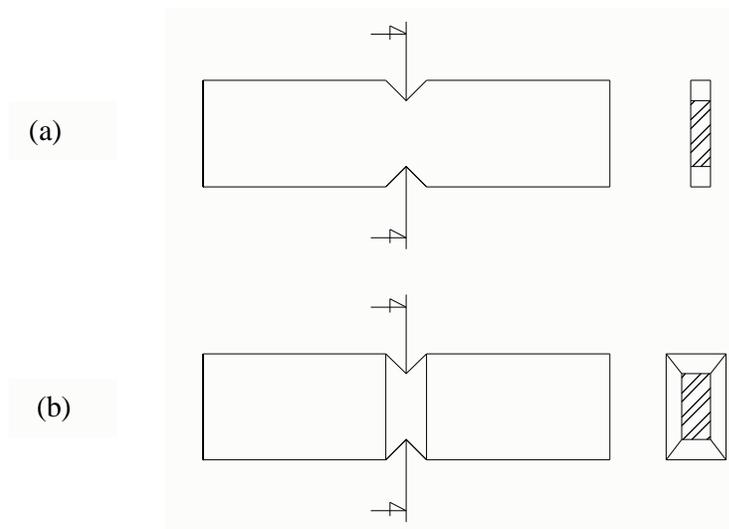


Figura 5 - Típicas fraturas de amostras com (a) dois e (b) quatro entalhes (TARNOPOL'S et al, 2000).

O valor mais elevado da tensão de cisalhamento foi medido no teste de Iosipescu. Os estudos mostraram que o teste de Iosipescu e o AFPB são satisfatórios para determinações da força de cisalhamento das combinações estudadas e que o entalhe extra nas amostras permitiram perceber o modo de cisalhamento das amostras (TARNOPOL'S et al., 2000).

ALMEIDA & MONTEIRO (1999), utilizaram o Teste de Iosipescu para avaliar a resistência à tração de materiais frágeis. Medir as propriedades mecânicas em materiais frágeis passa por muitos desafios. Em princípio, o teste de tensão uniaxial deveria ser evitado devido às dificuldades experimentais tais como, esmagamento das extremidades durante o aperto das garras na máquina universal de ensaios, que podem comprometer a confiabilidade dos resultados encontrados.

A resistência à tração de materiais frágeis é, normalmente, determinada pela tensão de ruptura e o teste de Iosipescu pode ser usado para determinar a resistência à tração destes materiais devido a certas vantagens desse método quando comparado a outros, podendo incluir o uso de amostras pequenas, variação nos apertos durante os ensaios e a existência de um estado de tensão uniforme.

A Figura 6 apresenta o círculo de Mohr que corresponde à tensão resultante agindo na amostra. As tensões principais (σ_1 e σ_2) atuam no plano da amostra, na região do entalhe e em paralelo a superfície do entalhe. A falha acontece perpendicularmente a esta direção causada por uma tensão de cisalhamento (τ) e o valor desta tensão é usado para avaliar a resistência à tração.

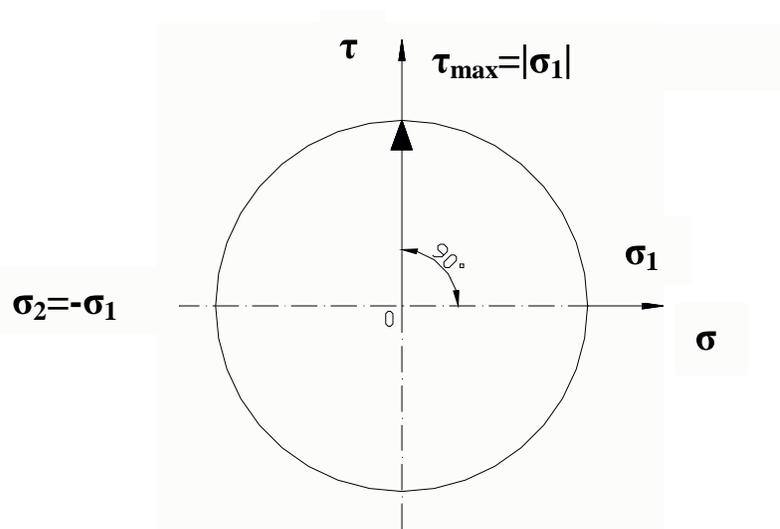


Figura 6 - Círculo das tensões de Mohr (ALMEIDA & MONTEIRO, 1999).

PIERRON & VAUTRIN (1994), investigaram a qualidade das superfícies das amostras fabricadas. Em algumas amostras foi observada a ocorrência de uma diferença na tensão de cisalhamento de uma face para a outra e quase nenhuma em outras amostras. Para examinar o perfil dessas superfícies foi usado um rugosímetro, com o qual foi possível concluir que em algumas amostras a face de uma amostra era diferente da outra, sendo que esses pequenos defeitos eram responsáveis pelas diferenças nos valores do módulo de cisalhamento encontrados.

HO et al., (1993), realizaram uma análise utilizando elementos finitos para o Teste de cisalhamento Iosipescu para combinações unidirecionais e lâminas cruzadas. Um fator de correção, necessário para compensar a não-uniformidade da distribuição de tensões, foi calculado e utilizado para corrigir o módulo de cisalhamento. O principal objetivo deste trabalho foi elaborar uma análise por meio do método dos elementos finitos para modelar a transferência de carga e as condições de deslocamentos entre a amostra e o sistema de fixação. A tensão de cisalhamento entre os entalhes não é constante para as diferentes orientações e materiais, devido a não-uniformidade da distribuição de tensão de cisalhamento no cálculo do módulo de cisalhamento. Para isso foram desenvolvidos fatores de correção. Este fator de correção, que é utilizado para compensar a não uniformidade da tensão de cisalhamento, depende das relações de ortotropia do material.

Após a execução e avaliação das amostras pelo teste de Iosipescu, concluiu-se que o comportamento das amostras, tipos de apertos, instalações deveriam ser considerados dentro do modelamento em elementos finitos. Tal modelamento foi influenciado pela dureza e pelas diferentes orientações das fibras que produziram diferentes deformações nas amostras.

SULLIVAN (1988), declarou que em um Teste de Iosipescu carregado corretamente, as duas tensões $\pm 45^\circ$ deveriam ser iguais em magnitude e opostas em sinal para uma razoável aproximação. MORTON et al., (1993) e LEE & MUNRO (1990), mostraram que esta condição não pode ser alcançada experimentalmente.

CHIANG & HE (2002), realizaram uma avaliação teórica da aplicabilidade do teste de Iosipescu para combinações híbridas de vidro unidirecionais e fibras de carbono misturadas. As amostras com entalhe em V foram analisadas usando o método de elementos finitos. Os estudos mostraram que, teoricamente, o entalhe em V pode ser usado para determinar o módulo de cisalhamento nas combinações híbridas quando este for corretamente usado. Porém, falhas prematuras causadas pelas concentrações de tensão perto das raízes dos entalhes podem causar um erro na determinação da tensão de cisalhamento nas combinações

híbridas. Pode-se observar, de forma geral, que para o sistema híbrido estudado, a distribuição de tensão de cisalhamento fica singular próximo ao entalhe e apresenta um valor relativamente uniforme dentro da região central do corte transversal. Um modo para reduzir a concentração de tensão ao redor das raízes dos entalhes consiste em mudar os ângulos do entalhe. A partir deste trabalho, a concentração de tensão na área da raiz do entalhe foi avaliada para diferentes ângulos, enquanto que os tamanhos das malhas continuaram inalterados.

ZHOU et al.,(1995), utilizaram 3 diferentes configurações de lâmina vidro/epoxi e estas foram testadas para medir o cisalhamento no plano e cisalhamento interlaminar pelo teste de Iosipescu. Um razoável estado de tensão de cisalhamento puro foi alcançado na região entre as raízes dos dois entalhes em V. Neste trabalho foi observado que para todas as amostras ensaiadas as propriedades de cisalhamento no plano aumentam com o número de direções da fibra, entretanto, o módulo de cisalhamento interlaminar diminui com o aumento do número de direções da fibra.

SWANSON et al., (1985), mediram a resistência do cisalhamento e a tensão de cisalhamento para compósitos poliméricos. Neste trabalho o teste Iosipescu mostrou ser recomendado.

BHATNAGAR et al., (1995), realizaram um estudo em amostras unidirecionais e reforçadas com diferentes orientações de fibra de vidro e o teste de Iosipescu foi adotado para avaliar a tensão de cisalhamento no plano. Para os ensaios, foram laminadas amostras com as seguintes orientações de fibras $[0^\circ]$, $[10^\circ]$, $[30^\circ]$, $[45^\circ]$, $[60^\circ]$, $[75^\circ]$ e $[90^\circ]$ visando alcançar uma tensão de cisalhamento mais adequada, pois os compósitos são, em sua grande maioria materiais anisotrópicos e heterogêneos. Durante a realização dos ensaios mecânicos, os autores procuraram evitar a ocorrência de quaisquer problemas tais como: delaminação, fibras que não sofrem tração, etc.

Após a obtenção dos valores obtidos a partir do ensaio Iosipescu foi concluído que este teste é um método efetivo para se caracterizar as propriedades de cisalhamento nas amostras com diferentes orientações de fibra e as tensões de cisalhamento dependem, fortemente, dos ângulos das fibras e também do ponto de aplicação das forças.

MORTON et al., (1992), comparou a tensão de cisalhamento obtida em uma face da amostra utilizando a técnica de Moiré com o valor dado por uma medida padrão na face oposta. Isto permitiu a descoberta de efeitos que não se encontravam no plano e avaliar os erros causados pela não-homogeneidade do campo de tensão. Além disso, o método apresenta

a vantagem de se calcular a média das propriedades de cisalhamento sobre uma grande área devido à heterogeneidade do material.

BANSAL & KUMOSA (1998), utilizaram a instalação de teste de Iosipescu biaxial, que, teoricamente, é capaz de gerar nas amostras dos compósitos os modos de falhas I e II, devido ao entalhe nas amostras. O carregamento condiciona um modo de falha II juntamente com um crescente aumento do modo de falha I. Isso se deve a variação do comprimento e dos ângulos dos entalhes nas amostras.

BARNES et al., (1986), estudaram analiticamente e experimentalmente o uso do Teste de Iosipescu para a avaliação das propriedades de cisalhamento em lâminas unidirecionais com duas orientações de fibra (0° e 90°).

Um dos principais problemas em teste de cisalhamento é a influência das tensões de cisalhamento nos resultados experimentais finais. A amostra de teste ideal deve conter uma região de estado de tensão de cisalhamento puro e uniforme e esta acentuada região de cisalhamento deve existir dentro de ambas as regiões elásticas e plásticas até a falha da amostra. O comportamento das amostras foi significativamente diferente. (BARNES et al., 1986).

Em quase todos os casos ocorreu a separação total da amostra e trincas secundárias foram formadas ao longo do entalhe.

A característica mais importante do teste de Iosipescu é que ele produz uma região de cisalhamento quase puro entre os entalhes. Nenhuma mudança significativa no módulo de cisalhamento foi observada. Em contraste, o cisalhamento interlaminar pela força foi fortemente dependente da orientação das fibras dentro das amostras (BARNES et al., 1986).

Foram observados dois modos de falha diferentes. As falhas nas lâminas com fibras alinhadas paralelas ao longo do eixo das amostras resultaram na formação de divisões axiais simétricas junto às raízes dos entalhes e no caso de amostras que continham fibras orientadas junto ao eixo da raiz do entalhe, a falha foi catastrófica e foi iniciada na raiz do entalhe e se desenvolveu entre os entalhes (BARNES et al., 1986).

A análise de elementos finitos mostrou as distribuições de tensões existentes ao redor das raízes do entalhe e que são dependentes da relação de ortotropia e orientação das fibras e da existência de uma tensão de cisalhamento relativamente uniforme nessa região e uma tensão de compressão pequena (BARNES et al., 1986).

As propagações das trincas nas duas orientações de fibra examinadas são controladas por combinações diferentes de tensões normais e de cisalhamento.

Este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de projetos de componentes mecânicos feitos com materiais compósitos reforçado, analisando o comportamento desses materiais através de ensaios experimentais em laboratórios. Esta análise fornecerá informações ao projetista permitindo a obtenção de um projeto mais otimizado estruturalmente.

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Por quê os componentes mecânicos falham? Esta é uma questão que vem preocupando os cientistas e engenheiros por vários séculos. Uma resposta razoável a esta pergunta é apresentada a seguir: “Os componentes mecânicos falham devido às tensões excederem suas resistências”. Entretanto, esta resposta permite a elaboração de outra pergunta. Que tensões causam falhas? Seriam as tensões: de tração, de compressão e de cisalhamento, independentemente ou uma combinação entre elas. Também, é oportuno questionar sobre a característica de carregamento do componente mecânico. Carregamento estático ou dinâmico? Ainda, como a presença de defeitos internos no material influenciará na capacidade de carga de um componente mecânico? Respostas a estas perguntas exigem procedimentos experimentais e fundamentos teóricos bem elaborados.

No ensaio de tração considera-se apenas a tensão normal. Entretanto, o círculo das tensões de Mohr mostra que uma tensão de cisalhamento sempre se encontra presente, sendo exatamente a metade da tensão normal. Entre estas tensões, qual delas poderia provocar a falha?

Para o ensaio de torção considera-se que o carregamento por torção simples, causa apenas tensão de cisalhamento. Entretanto, analisando os círculos encontra-se uma tensão normal de valor igual à tensão de cisalhamento e outra de mesmo valor com sinal trocado. Quais destas tensões provocam a falha, a tensão normal ou, a tensão de cisalhamento?

Em geral, os materiais dúcteis, sob carregamento estático, são limitados pelas tensões de cisalhamento. Em uma amostra de aço de baixo teor de carbono tensionada é possível visualizar as linhas de Lüder-Chernov que ocorrem, aproximadamente, a 45° com eixo de aplicação de força. Os materiais frágeis apresentam uma deformação específica na ruptura abaixo de 5% no gráfico tensão-deformação. Os metais dúcteis apresentam uma deformação específica na ruptura acima de 10%. Esta apreciável deformação permite que grande redução

de área transversal ocorra até o momento de ruptura, enquanto os materiais frágeis pouco mudam sua forma sob aplicação de uma força.

Se o material é dúctil a falha é, usualmente, especificada pela iniciação do escoamento do material, isto é, pela iminência de falha por escoamento. Para um material frágil a falha é especificada pela fratura, a partir da separação do componente mecânico em duas ou mais partes. Estes modos de falhas ocorrem em componentes mecânicos submetidos a um estado uniaxial de tensões, como no caso simples do ensaio de tração. Ao introduzir um entalhe circunferencial em um corpo-de-prova de aço com baixo teor de carbono submetido à tração ocorrerá, na região do entalhe um estado triaxial de tensões provocando uma fratura com pouca redução de área transversal. Assim, por exemplo entalhes, vazios, bolhas e imperfeições causam uma redução da capacidade de redução de área sob tração do material e diferentes critérios de resistência envolvendo tensões individuais e/ou combinadas devem ser consideradas na avaliação da capacidade de carga de um material.

Com o avanço tecnológico, têm-se desenvolvido novas técnicas de projeto de componentes. Neste contexto, isto fez crescer a utilização de compósitos em aplicações industriais.

Visto que os compósitos são obtidos a partir da combinação de dois ou mais materiais com diferentes características físico-químicas e mecânicas, como também são produzidos por meio de processos de manufatura distintos e tem a necessidade de desempenhar funções estruturais cada vez mais exigentes, os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento nesta área são muito promissores.

O crescimento do uso dos compósitos estruturais tem estimulado a formação de recursos humanos, empenhados em atingir com êxito os desafios da obtenção de componentes com múltiplas funções, atendendo a requisitos de projeto como: menor peso específico, maior resistência mecânica e rigidez específica, resistência à corrosão, entre outros.

Ao dispor de uma placa de vidro/epoxi de 8 camadas visando uma utilização correta deste material como um elemento estrutural podemos listar as seguintes motivações para a realização deste trabalho:

- Quais tensões considerar na avaliação da integridade dos compósitos?
- Quais são os conhecimentos adquiridos e que permitam transferência de informações quanto à caracterização das propriedades mecânicas ao cisalhamento de um compósito?
- Como obter amostras de ensaio em uma placa de compósito?

- Durante a obtenção de uma placa de um compósito, podem ocorrer tensões residuais? Como avaliá-los?
- Quais são os modos de falha do compósito?

Com a finalidade de contribuir para o conhecimento das propriedades mecânicas de materiais compósitos neste trabalho foi utilizado o teste de Iosipescu para a caracterização das propriedades mecânicas quanto ao cisalhamento do compósito vidro/epóxi laminados.

1.3 OBJETIVO DA PESQUISA

Por meio das atividades a serem desenvolvidas no presente trabalho, espera-se contribuir para a formação do conhecimento em ensaios mecânicos, a partir de teste de cisalhamento de Iosipescu, bem como transferir estas informações sobre a obtenção das propriedades mecânicas do compósito laminado reforçado com fibras de vidro/epoxi sob esforços de cisalhamento, para uma correta utilização destes compósitos no dimensionamento de máquinas e estruturas.

1.4 CONTEÚDO

No Capítulo 1 faz-se uma revisão dos trabalhos publicados na área com a utilização do Teste de Iosipescu para diversas finalidades e diferentes tipos de materiais compósitos reforçados. Mostram-se os tipos de ensaios e suas diferentes respostas, assim como a evolução dos ensaios e de seus resultados.

No Capítulo 2 faz-se um estudo inicial sobre as propriedades dos materiais compósitos e suas características principais, propriedades elástica, matrizes e fibras.

No Capítulo 3 apresenta-se os métodos, procedimentos e dispositivos utilizados para a execução dos ensaios, como também o processo de fabricação das amostras.

No Capítulo 4 faz-se uma análise dos resultados com relação as deformações específicas e os modos de falha do compósito analisado.

No capítulo 5 tem-se a conclusão sobre os resultados obtidos para o estudo do compósito reforçado com fibras de vidro/epóxi de 8 camadas e se encerra com algumas discussões e sugestões para novos estudos.

Capítulo 2

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Muitas das tecnologias modernas requerem materiais com combinações de propriedades não usualmente satisfeitas pelas ligas de metais convencionais, cerâmica e materiais poliméricos, especialmente em se tratando da área aeronáutica, onde são necessárias baixas densidades, altas resistências, rigidez à abrasão e ao impacto. O acelerado desenvolvimento de materiais compósitos reforçados, ocorrido nos últimos anos, tem propiciado novas alternativas para solucionar tais problemas, fornecendo novas possibilidades (CALLISTER JR., 1985).

Um material multifase exibindo uma combinação de propriedades que o torna superior a cada fase de sua composição pode ser considerado um compósito (CALLISTER JR., 1985). De acordo com esse princípio de ação combinada, procura-se moldar os melhores arranjos de propriedades por uma combinação criteriosa de dois ou mais materiais distintos. Esses materiais que formam o compósito podem ser classificados como aglomerante (fase contínua ou matriz) ou reforçante (fase dispersa). A matriz tem como função manter os reforçantes unidos, transmitindo a estes o carregamento aplicado. Os reforçantes têm como principal

função suportar os carregamentos transmitidos pela matriz. Devido a grande variedade de matrizes e reforçantes, CALLISTER JR (1985) decidiu classificá-los como:

-Compósitos Granulares: são formados por partículas de vários tamanhos e formas dispersas aleatoriamente na matriz. Devido a essa aleatoriedade, tais compósitos, podem ser considerados quase-homogêneo e quase-isotrópicos, se examinados em uma escala maior que o tamanho das partículas.

-Compósitos de Fibras Descontínuas: apresentam como reforço pequenas fibras. Estas fibras, consideradas largas quando o comprimento é comparado com seu diâmetro, podem ser dispostas aleatoriamente ou ao longo de uma direção. No primeiro caso, o compósito pode ser considerado quase-isotrópico, e, no segundo, tende a ser anisotrópico ou mais especificamente, ortotrópico.

-Compósitos de Fibras Contínuas: são reforçados por longas fibras contínuas e são mais eficientes do ponto de vista de rigidez e resistência mecânica. As fibras podem ser todas paralelas (unidirecional), dispostas perpendicularmente (bidirecional) ou orientadas em vários ângulos (multidirecional).

-Compósitos de Matriz Polimérica: divide-se em termorrígidos (epóxi, poliéster) e termoplásticos (poli-éter-éter-cetona (PEEK), poli-sulfona (PSU), poli-éter-imida (PEI)) reforçados com fibras de vidro, carbono, aramida (Kevlar) ou boro.

-Compósitos de Matriz Metálica: consistem em ligas metálicas (alumínio, magnésio, titânio, cobre) reforçados com fibras de boro, carbono, cerâmica ou metálicos. Sua temperatura de serviço máxima é definida pela temperatura de fusão da matriz.

-Compósitos Carbono / Carbono: consistem de matriz e reforço de carbono ou grafite. Apesar da mesma composição, fibra e matriz apresentam diferentes propriedades físicas e mecânicas. Apresentam a propriedade única de resistência relativamente alta a elevadas temperaturas (acima de 1000° C em atmosfera inerte) associadas à baixa massa específica e expansão térmica.

No caso de componentes que utilizam fibras de vidro como reforçantes (laminados), o baixo peso é garantido pela matriz utilizada, que em geral apresenta baixa densidade (entre 1.1 e 1.2 g/cm³). Em MATTHEWS & RAWLINGS (1994) constata-se que a densidade do compósito depende das densidades dos constituintes e das proporções que eles aparecem, e esta pode ser obtida a partir da regra das misturas.

Outro aspecto interessante é a inerente anisotropia, ou seja, a presença de propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas diferenciadas direcionalmente ao longo do material. Isto permite ao projetista desenvolver as propriedades do material juntamente com as

características geométricas e funcionais da peça, com o objetivo de se obter o desempenho desejado (VINSON & SIERAKOWSKI, 1986). Segundo CARVALHO (1996) no projeto de um componente feito de material compósito é extremamente necessária à atenção no que se diz respeito às particularidades que ele apresenta, tais como:

- 1-Diferentes propriedades mecânicas dependendo da orientação da fibra na peça;
- 2-Escolha apropriada das fases, ou seja, dos reforçantes e aglomerantes e suas proporções a fim de se obter o comportamento desejado;
- 3-Fatores de processamento que influem nas propriedades do produto obtido.

2.2 MATRIZES E FIBRAS

Matrizes (Fase Contínua)

A fase contínua de um compósito é conhecida como matriz. As matrizes podem ser materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, sendo que os polímeros são os mais utilizados devido ao baixo custo e a facilidade de processamento. Como já foi comentada, uma das funções da matriz é envolver a fibra e assim permitir que os esforços atuantes na peça sejam transmitidos.

As matrizes poliméricas podem ser classificadas em termoplásticas e termofixas (termorrígidas). As matrizes termoplásticas, geralmente, se apresentam no estado sólido à temperatura ambiente e, com a evolução da temperatura pode se fundir ou amolecer, tornando-se líquidas, sendo este um processo reversível. As resinas termorrígidas são mais comuns para uso estrutural devido a serem utilizadas desde a década de 50, e, portanto, existir um maior volume de literatura sobre suas propriedades, assim como a existência de um ferramental já introduzido nas indústrias transformadoras de compósitos. Estas resinas são, na maioria dos casos, líquidas a temperatura ambiente e com o aquecimento podem sofrer um processo de cura onde são originadas ligações cruzadas tornando a matriz rígida e não fusível. LUCATO (1991) observou que dentre as termofixas, existem as epoxídicas que apresentam inúmeras vantagens para o desenvolvimento de projetos:

- 1- Apresentam baixa viscosidade, facilitando a moldagem;
- 2- Fornecem baixa contração, evitando tensões residuais;
- 3- Possibilitam a cura à temperatura ambiente;

- 4- Possuem alto módulo de elasticidade e compressão;
- 5- Propiciam aplicações estruturais de alto desempenho.

As resinas epoxídicas apresentam características negativas tais como: aderência indesejável nas paredes do molde em que estão sendo processadas (BLASS, 1985), além disso, não possuem a característica de reciclagem, pois pertencem ao grupo das resinas termofixas. Apesar das características negativas apresentadas pelas resinas epoxídicas, ainda hoje elas são usadas em grande escala para o desenvolvimento de projetos estruturais.

Fibras (Fase Dispersa)

As fibras constituem o segundo material na composição de alguns compósitos reforçados, tendo a importante missão de suportar os esforços provenientes da matriz. Elas se apresentam, basicamente, em três formas: fibra contínua, não contínua ou fibra picada. Um importante fator a ser considerado no projeto com compósitos reforçados é a orientação que a fibra assume. As propriedades mecânicas finais também dependem fortemente da porcentagem de fibra empregada e da forma que o material é processado. Fibras em forma de mantas e fios se caracterizam por fornecer reforços apenas na direção que estão dispostas, já os tecidos ortogonais permitem reforços em duas direções e as fibras picadas produzem na sua grande maioria reforços aleatórios. Portanto, o arranjo pode ser unidirecional, bidirecional, tri-axial ou aleatório. Os dois primeiros possuem características anisotrópicas, ou seja, suas propriedades dependem das direções do reforço no produto final (HANDBOOK of COMPOSITES, 1982). A orientação é então escolhida levando-se em consideração as direções dos esforços que atuam no componente. Outro aspecto a ser considerado é o comprimento da fibra, que caracteriza a rigidez de um compósito reforçado. Isto ocorre porque a rigidez do laminado depende diretamente da magnitude de tensão que a matriz consegue transmitir para as fibras. Tal fenômeno de transmissão de carregamento é função do comprimento das fibras e da adesão da mesma à matriz.

Se o laminado possui fibras mais longas, a eficiência do reforço aumenta, pois o máximo carregamento se distribui ao longo de boa parte da fibra. Entretanto, os componentes com fibras abaixo do comprimento crítico apresentam deformações na matriz ao redor das fibras, o que leva a uma transferência inadequada de tensão e a um pequeno efeito de reforço por parte da fibra. Das inúmeras fibras existentes, a fibra de vidro é a mais comumente utilizada tanto na forma picada como na forma contínua devido às suas diversas aplicações, propriedades mecânicas relativamente boas e baixo custo.

Interface Fibra/Matriz

Um ponto que merece grande atenção está relacionado à interface fibra-matriz. Para garantir que os esforços sejam transmitidos de uma fase para a outra, deve-se propiciar uma forte adesão entre as fibras de vidro e a matriz epoxídica. Caso não haja esta forte interação, o material ficará sujeito à propagação de trincas em maiores escalas (SHACKELFORD, 1996). Este fato influi diretamente na escolha dos materiais a serem empregados, pois a combinação de quaisquer fases nem sempre propiciará a interação adequada fibra-matriz, sendo às vezes necessário um tratamento superficial nas fibras para que estas interajam de uma maneira melhor com as matrizes.

Compósitos Reforçados com Tecidos

Segundo PARDINI (1998), existe basicamente três tipos de padrões de tela básicos que dão origem a tecidos mais complexos:

- Tecido tipo plano (Plain): é a forma mais simples de todos os tecidos de reforço estrutural. A tela consiste de cabos interlaçados do urdume e da trama que se dispõem em um padrão onde cabos da trama se entrelaçam acima e abaixo dos cabos do urdume.
- Tecido tipo cetim (Hardness Satim): ajustam-se mais as superfícies de contorno complexas, onde as camadas individuais destes tecidos são assimétricas e são formadas de tal forma que os cabos apresentem um comprimento maior entre as sobrepassagens ou amarrações.
- Tecido tipo Twill: os tecidos twill são facilmente identificáveis pelas linhas diagonais que a tela forma na superfície do tecido. Os cabos nesse tipo de tecido são usualmente bem empacotados e espaçados na largura exata do mesmo e desta forma se mantem firmes na posição.

2.3 PROPRIEDADES ELÁSTICAS

As propriedades elásticas tais como módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dos materiais compósitos poliméricos reforçados são necessários para a utilização destes em projetos de componentes estruturais. Para isto, torna-se necessário saber como determinar estas propriedades mecânicas visando uma futura otimização do material (CALLISTER JR., 1985).

Após a determinação dessas propriedades, usa-se um procedimento de cálculo bastante usual para material compósito que está baseado na Teoria Clássica de Laminados. Tal teoria fornece resultados aproximados devido à complexidade das características do laminado. As propriedades elásticas de um material compósito são tratadas de forma diferenciada, pois dependem fortemente das propriedades, orientação e distribuição de cada camada. Sendo assim, VINSON & SIERAKOWSKI (1986) analisaram os materiais compósitos sob dois pontos de vista: micromecânico e macromecânico. É possível verificar que a abordagem micromecânica trata da fração volumétrica e propriedades da fibra bem como da matriz para caracterizar a lâmina sem levar em conta a estrutura interna dos elementos constituintes. Já a abordagem macromecânica toma uma combinação das propriedades das lâminas para caracterizar o laminado. Neste instante, a microestrutura da lâmina é ignorada e as propriedades longitudinais e perpendiculares de alinhamento das fibras são reconhecidas. Assim, o elemento estrutural resultante é constituído por uma combinação sistemática de lâminas.

Segundo HULL (1981) algumas suposições devem ser realizadas quando se utiliza a Teoria Clássica de Laminados:

- O material é ortotrópico;
- O material apresenta homogeneidade na sua composição;
- As camadas (lâminas) estão perfeitamente aderidas, não havendo deslocamento relativo entre as mesmas;
- Considera-se estado plano de tensões em cada camada;
- As propriedades finais dependem da orientação de cada camada relativa à outra

subseqüente.

Pelo que foi exposto até o presente momento, existe uma grande dificuldade de se prever as propriedades elásticas do compósito somente com dados referentes aos seus constituintes, ou seja, propriedades individuais da fibra e resina. Muitas vezes torna-se necessário a execução de ensaios mecânicos representativos em espécies unidirecionais. As propriedades mecânicas medidas podem então serem usadas para a estimativa de desempenho de compósitos multidirecionais, ou seja, aqueles que apresentam várias camadas orientadas em direções diferentes (HO et. al, 1993). CARVALHO (1996) descreve algumas particularidades dos ensaios em compósitos. Destacam-se:

- geração de níveis de carregamento adequados sem causar danos nas amostras;
- uso de dimensões apropriadas (em particular espessura) em relação à escala de heterogeneidade do material;
- severos efeitos de borda (“end-effects”), que dependem da geometria da amostra (specimen) e do grau de anisotropia;
- falha prematura em fixações ou em pontos de aplicação de carga;
- efeito de borda (“free edges”) ou aparecimento de outros mecanismos de falha;

2.4 REQUISITOS DE PROJETO

Desde muitos anos o homem combina propriedades de materiais diferentes para atingir seus objetivos. Embora os benefícios trazidos pelos materiais compósitos sejam conhecidos há milhares de anos, apenas há alguns anos atrás é que se desenvolveu a tecnologia desses materiais (TSAI, 1986). As características que combinam elevada resistência e baixa densidade assim como a, redução de peso, chamou a atenção da indústria em geral. Além da indústria aeronáutica e automobilística, outras indústrias vêm, cada vez mais, fazendo uso desses materiais, como é o caso da indústria náutica, de artigos esportivos, da construção civil, espacial e petroquímica.

Por outro lado, durante muitos anos os engenheiros utilizam apenas materiais isotrópicos para o desenvolvimento de projetos. Com o avanço tecnológico e o aumento da concorrência a indústria teve que repensar em novas técnicas de como projetar, forçando o engenheiro à não ser um mero selecionador de material, mas também um projetista de materiais. De acordo com TSAI (1986), projetar com qualquer material consiste mais em uma

forma de arte do que em ciência, entretanto, projetar com material compósito é muito mais ciência do que arte, pois tudo deve se basear na Teoria de Laminados. Para isso é proposto a criação de 4 níveis para simplificar a abordagem de um projeto em material compósito:

1- *Projeto para otimização dos materiais*: as formulações que envolvem a contribuição da fibra e da matriz e os efeitos higrotérmicos devem estar relacionados com a rigidez e a resistência do laminado;

2- *Projeto para otimização estrutural*: a Teoria de Laminados com algumas simplificações permite prever, de maneira rápida, um laminado simétrico ou anti-simétrico;

3- *Projeto para otimização da resistência*: a abordagem das tensões principais é recomendada para os casos com presença de carregamento simples; para os casos com carregamento combinados necessita-se de uma abordagem sobre a seqüência de empilhamento das lâminas;

4- *Projeto para minimizar a deformação ou incrementar a estabilidade elástica* (problemas de flambagem): necessita-se também de uma abordagem sobre a seqüência de empilhamento das lâminas.

Esta idéia foi simplificada, citando algumas regras para projetar com materiais compósitos tais como: tentar obter paredes com pequena espessura; evitar acúmulo de massa; evitar a formação de bolhas; prever como será a desmoldagem da superfície durante o processo de fabricação; etc. Nota-se que elas são muito parecidas com regras para projetar peças plásticas. Entretanto, deve-se sempre atentar para os limites que governam os projetos tais como: tensões; deformações e deslocamentos permitidos. Segundo CARVALHO (1996), o componente final fabricado em material compósito deve satisfazer não somente os requisitos de rigidez e resistência mecânica, mas também deve ser aceitável em termos de custos. Os requisitos de projeto estão presentes na primeira etapa do ciclo e alguns destes requisitos são brevemente discutidos a seguir:

Caracterização de material e testes:

A caracterização do material, quando se trabalha com compósitos é de fundamental importância no projeto de componentes feitos a partir deste tipo de material. Testes podem ser executados durante toda a vida do componente com os mais diferentes propósitos como, por

exemplo, determinação de parâmetros de projeto, teste de desempenho em serviços e controle e garantia de qualidade.

Resistência estática:

Basicamente, a determinação da resistência estática de um componente em compósito é realizada em duas fases:

- 1- As tensões e deformações em cada camada (layer) são determinadas;
- 2- Os efeitos das tensões e deformações na resistência global da estrutura são determinados por meio de um modelo matemático.

Resistência à fadiga:

O comportamento à fadiga de compósitos difere dos metais em muitos aspectos. Por exemplo, compósitos unidirecionais carregados somente por tração apresentam, geralmente, limites de fadiga com níveis de tensões superiores aos níveis limites de ruptura. Contudo, maiores danos acontecem quando carregados em compressão ou ciclos tração-compressão. Falhas por fadiga em compósitos são geralmente acompanhadas por danos extensivos a todo material, em vez da formação de uma falha predominante como ocorre em materiais isotrópicos. Quatro mecanismos básicos de falha estão presentes: formação de trincas na camada de um compósito, delaminação, quebra das fibras, e ruptura da interface fibra-matriz. Qualquer combinação destes mecanismos pode causar falha por fadiga. Atualmente, o desenvolvimento de procedimentos de análise de fadiga em compósitos é objetivo de intensa pesquisa e já existem alguns procedimentos tradicionalmente usados para metais que estão sendo gradativamente adaptados para prevenir falhas em compósitos.

Fatores de segurança:

Para se prever possíveis sobrecargas da estrutura, cargas menores não previstas em projeto, diferenças nas condições ambientais, simplificações e suposições nos cálculos, bem como incertezas nas propriedades do material. Fatores de segurança são normalmente aplicados quando se projeta com compósitos. Isto é válido também para materiais isotrópicos convencionais, sendo que a diferença, no caso dos compósitos, é que a variação das propriedades do material, como resultado do processamento, pode ser muito maior do que nos materiais convencionais e que o modo de falha não é completamente previsível. Apesar do senso comum de que tais fatores de segurança são necessários, não existe uma padronização geral em sua determinação.

Efeitos ambientais:

Aspectos relativos ao meio-ambiente, dependendo dos constituintes do compósito, podem afetar consideravelmente as propriedades mecânicas do mesmo. Elevadas diferenças de temperatura e umidade em aeronáutica e absorção de substâncias na indústria química são exemplos significativos deste tipo de problema.

Tolerância à danos:

O termo “damage-tolerant design” é normalmente utilizado para descrever uma estratégia de projeto na qual o componente é projetado de tal forma que a integridade da estrutura é mantida mesmo que um defeito de uma certa extensão esteja presente. Estes defeitos podem aparecer devido a uma série de fatores como furos, rasgos, extremidades livres ou causadas por danos em serviço, como delaminações e/ou trincas. Em adição a estes fatores e outros já mencionados, como fadiga e concentração de tensão, há ainda fatores a serem considerados, como defeitos de fabricação e danos causados por impacto.

Custos:

Componentes estruturais feitos de compósitos devem ter custos efetivos. Uma avaliação global de custos deve ser cuidadosamente executada. Por exemplo, um componente pode ser considerado caro quando avaliado individualmente em termos de material e processamento, mas pode se tornar bastante atrativo quando custos globais são considerados (CARVALHO, 1996). Exemplo deste fato pode ser visto em aplicações aeroespaciais.

Além de todos esses requisitos citados anteriormente, pode-se também caracterizar como requisito de projeto, o comportamento dinâmico que a estrutura venha desenvolver em serviço. Em alguns projetos deve-se conhecer as propriedades que caracterizam o comportamento dinâmico de uma estrutura sob a ação de um determinado carregamento. O objetivo é evitar danos estruturais indesejáveis.

Capítulo 3

MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

3.1 AMOSTRAS

Para PARDINI et al., (2000), os compósitos estruturais são materiais de grande interesse para aplicações em engenharia devido à baixa massa específica, aliada a alta resistência mecânica. Estes materiais são comumente manufaturados na forma clássica de empilhamento de camadas individuais de tecido bi-direcionais, ou camadas unidirecionais com orientação definida. Compósitos híbridos são formados pela utilização de mais de um tipo de fibra de reforço e/ou mais de um tipo de matriz. Estes compósitos híbridos têm sido utilizados tanto com o intuito de reduzir custo do produto final quanto para otimização de propriedades mecânicas.

A anisotropia de compósito bi-direcional permite medir as propriedades elásticas de amostras considerando vários ângulos em relação ao eixo principal do tecido (urdume). Nesse particular o módulo de elasticidade depende, principalmente, das fibras e o módulo de cisalhamento é governado, adicionalmente pela interface fibra/matriz.

As amostras de fibras de vidro/epóxi foram fornecidas pela Embraer. Os compósitos utilizados neste trabalho foram laminados em 8 camadas, mantendo o urdume a 0° , resultando em uma espessura nominal de 5 mm. Todos os laminados foram curados em autoclave a 121°C e pressão de 0,71 MPa.

As Figuras 7 e 8 apresentam o compósito vidro/epóxi, utilizando as fibras em forma de tecido (plain weave). O compósito obtido possui propriedades mecânicas orientadas conforme orientação URDUME sendo a TRAMA a 90° em relação à orientação do urdume. As orientações urdume e trama são previamente definidas em função da aplicação do compósito no projeto. Os tecidos urdidos e tramados são formados pela intercalação de fios em duas direções: urdume, que são os fios longitudinais e a trama composta por fios transversais.



Figura 7 - Compósito vidro/epóxi de 8 camadas.



Figura 8 - Amostra no tecido com a direção urdume.

A disposição das amostras é mostrada na Figura 15, considerando os entalhes normal a: orientação do urdume (amostras 1), 45° a partir da orientação do urdume (amostras 4), 45° a partir da orientação da trama (amostras 3) e orientação da trama (amostras 2). Também, as amostras foram confeccionadas com chanfros de 90° e 110°.

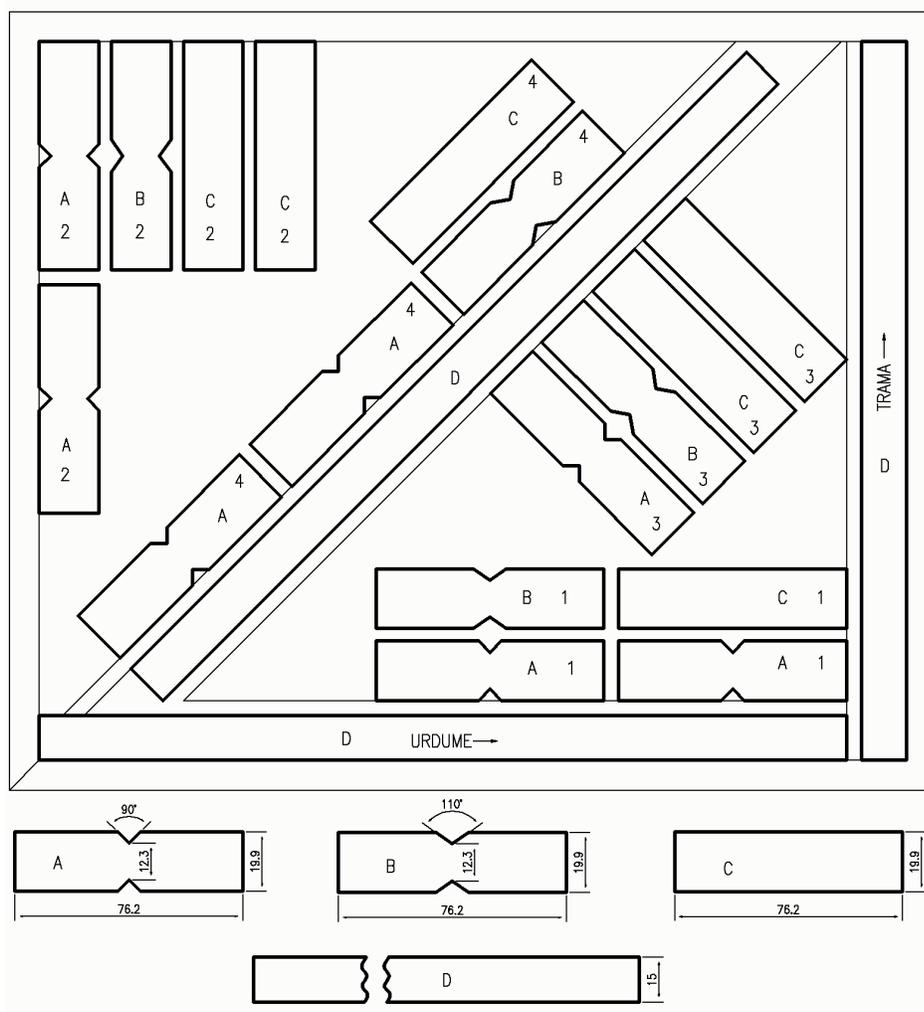


Figura 9 - Disposição das amostras.

O corte foi executado utilizando uma serra de fita a uma distância do contorno das amostras e, posteriormente, fresada cuidadosamente, bem como os entalhes, evitando deformação permanente por calor durante o processo de acabamento. A Figura 16 mostra o processo de corte inicial das amostras.

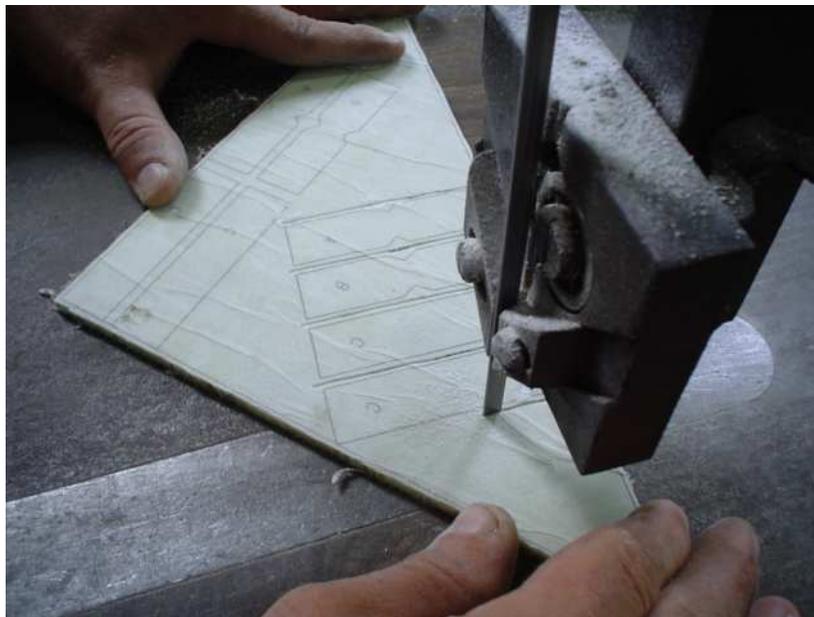


Figura 10 - Processo de corte inicial das amostras.

3.2 DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO

Para a realização desta pesquisa foi confeccionado, um dispositivo para atender à Norma ASTM D5379M-93, denominado ensaio de cisalhamento de Iosipescu, com o objetivo de avaliar a resistência ao cisalhamento e módulo de cisalhamento do compósito laminado reforçado com fibras de vidro/epoxi.

Este dispositivo de ensaio é composto de quinze elementos, como mostrados no desenho de conjunto (Figura 11).

Nesse tipo de ensaio a amostra a ser ensaiada tem a forma de uma viga retangular de pequenas dimensões com dois entalhes em V, sendo um aposto ao outro, no centro. A metade da amostra é alojada em um prendedor fixo e a outra metade em um prendedor móvel. A amostra é fixada pelos parafusos de ajustes e uma carga externa Q é aplicada por meio de um transdutor de carga.

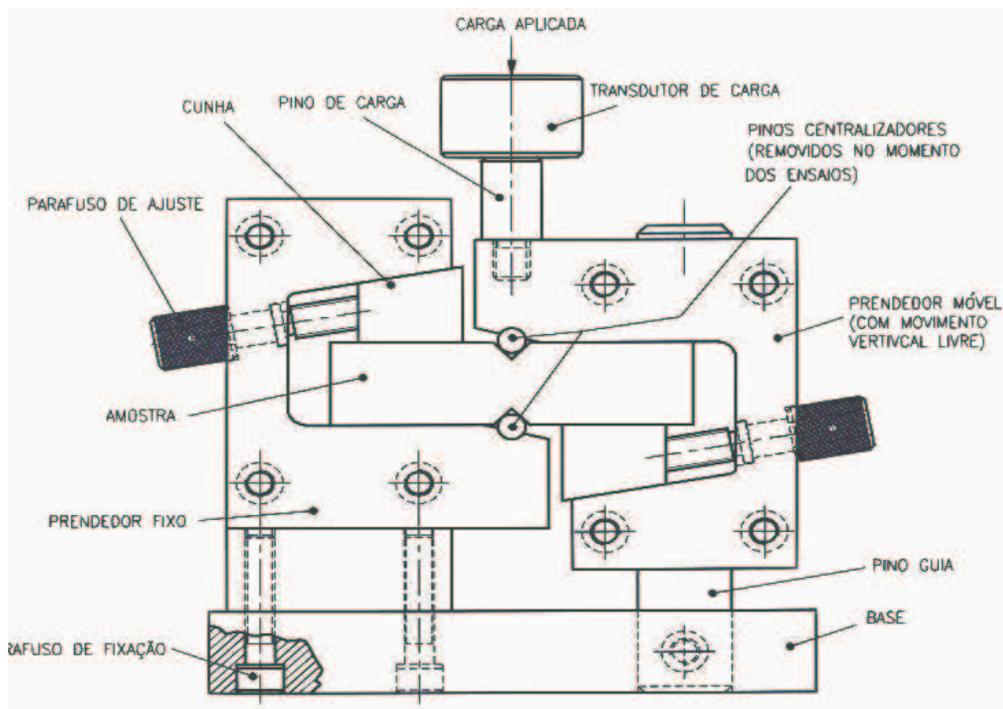
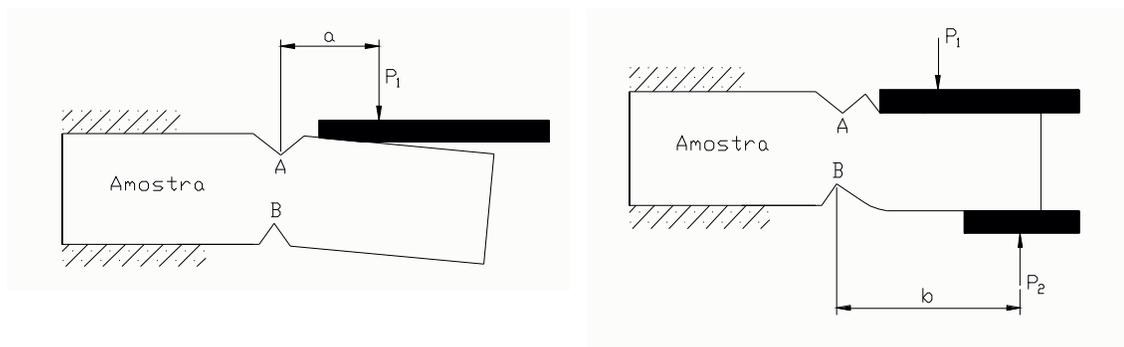


Figura 11 - Esquema do dispositivo de ensaio e amostra típica (ASTM D 5379M-93).

O esquema de movimentação do prendedor móvel encontra-se esquematizado na Figura 12. Neste esquema, quando a carga P_1 é aplicada existe a tendência de ocorrer uma rotação em uma região parcial da amostra (Figura 12a), mas, devido à configuração do dispositivo ocorre uma reação P_2 (Figura 12b) evitando a rotação da mesma, resultando em um movimento de translação de parte da amostra. Portanto, neste ensaio dois pares de força são aplicados através da seção entre raízes dos entalhes em V gerando dois momentos contrários, produzindo um estado puro e uniforme de tensão na seção A-B.



(a)

(b)

Figura 12 - Esquema de aplicação de cargas em amostra no teste Iosipescu.

Pode-se mostrar que a tensão, devido ao momento de flexão no centro da amostra em condição de engastamento perfeito, é nula e a tensão média de cisalhamento ao longo da linha A-B é dada pela equação:

$$\tau = \frac{P(b-a)}{ht(a+b)} \quad (3.1)$$

Onde a e b são as distâncias, em relação ao entalhe em V, de P_1 e P_2 respectivamente. A altura entre os pontos A e B é dada por h, t é a espessura da amostra e P é a carga externa aplicada.

Para HO et al. (1993), quando as cargas aplicadas são distribuídas, estas geram uma distribuição de deformação próxima a uma tensão uniforme e, para cargas concentradas, as deformações são grandes e podem causar a perda da integridade estrutural da amostra. Quanto mais longe os pontos de carga do entalhe estiverem, melhor será a distribuição e o cisalhamento obtido junto ao entalhe. Entretanto, se os pontos de carga estiverem muito longe, as forças concentradas ficarão tão grandes que poderão esmagar as amostras.

A partir da carga externa aplicada ao dispositivo, pode-se elaborar a Tabela 1. Os valores de P_1 , P_2 e P apresentados na Tabela 1, foram avaliados para uma carga externa Q ($=P_1+P_2$) e diferentes valores da razão a/b.

Tabela 1 - Valores de referência P_1, P_2, P e Q em função de a/b.

a/b	$P_1(N)$	$P_2(N)$	Q(N)	P(N)
	$\frac{Pb}{a+b}$	$\frac{Pa}{a+b}$	$\frac{P(b-a)}{a+b}$	
0,275	67,654	18,605	≈49,05	86,260
0,2875	67,655	19,451	49,05	87,106
0,30	70,071	21,021	49,05	91,093
0,3125	71,345	22,295	49,05	93,641
0,325	72,666	23,616	49,05	96,283
0,3375	74,037	24,993	49,05	99,025
0,35	75,461	26,411	49,05	101,873
0,375	78,480	29,430	49,05	107,910

Para HAWONG et al. (2004), a relação ideal de a/b é 0,3. Quando a relação se encontra próximo a 0,3, a carga efetiva aplicada produz uma tensão de cisalhamento mais uniforme e efetiva nas amostras.

Os resultados obtidos na Tabela 1 mostram uma real dificuldade em determinar experimentalmente, com precisão, as reações impostas pelo dispositivo de ensaio. Esta dificuldade ocorre devido às posições de apoio da amostra, tanto no prendedor fixo quanto no móvel, uma vez que a superfície de contato entre a amostra e os apoios não são perfeitos (Figura 13a). A Figura 13b mostra os apoios com ângulos de 5° , que, são mais recomendados por induzir uma carga concentrada entre os apoios e a amostra, permitindo posicionar melhor as distâncias a e b referentes a P_1 e P_2 , enquanto, os apoios planos induzem a uma carga não uniforme sobre a amostra.

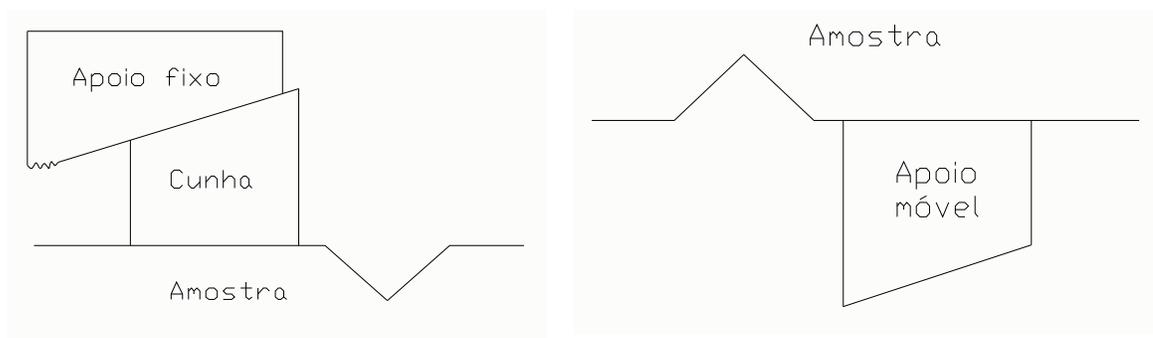


Figura13a – esquema de geometria dos apoios.

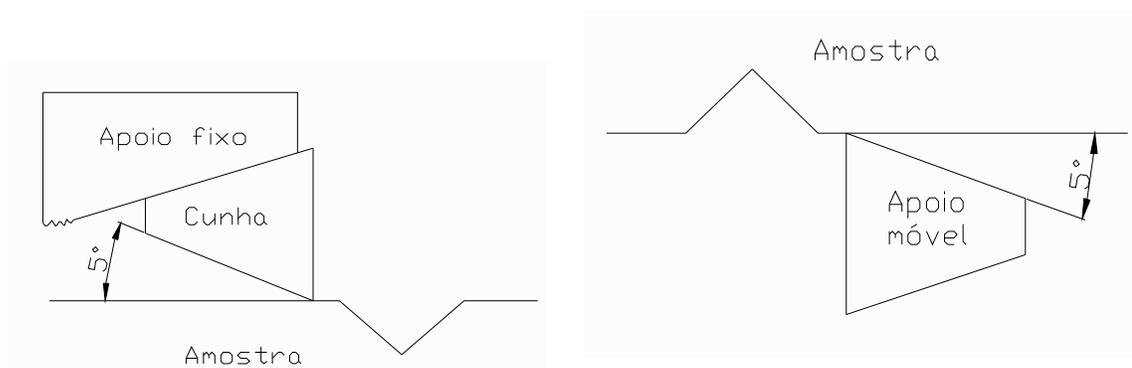


Figura 13b - Esquema de geometria de apoios.

Para a relação $a/b=0,3$, HAWONG et al. (2004), utilizaram dois dispositivos de teste de cisalhamento, o Teste de Iosipescu (IST) e o Hawong Teste de Iosipescu (HIST) e amostras com entalhes de 90° e 110° . No IST as cargas são aplicadas externamente às superfícies de apoios da amostra, enquanto, no HIST as cargas são aplicadas na linha neutra da amostra (Figura 14). Resultados mostraram que HIST é mais efetivo que IST devido aos pontos de

aplicação das cargas P_1 e P_2 serem bem definidos. No trabalho deles foram utilizados dois valores de ângulos de entalhe: amostras com ângulo de 90° com ocorrência da tensão de cisalhamento máxima no término do entalhe. E, amostras com ângulo de 110° com ocorrência da tensão de cisalhamento máxima no centro da amostra.

Utilizando-se da geometria de apoio como mostrado esquematicamente na Figura 9, pode-se obter melhores resultados para o Teste de Iosipescu denominado IST.

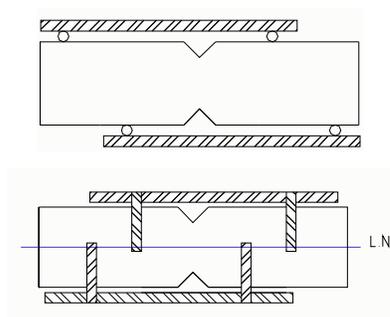


Figura 14 - Teste de cisalhamento IST e HIST (HAWONG et al., 2004).

Outra opção de carga é impor um deslocamento pré-estabelecido na amostra ensaiada, isto é, estabelecer para uma carga aplicada, um máximo deslocamento da amostra dentro do dispositivo de ensaio e, com isso, obter resultados mais precisos e sem a necessidade de se adotar um fator de correção. Entretanto, isso é muito difícil de se conseguir devido a não exatidão dos pontos de aplicação das cargas nas amostras.

Freqüentemente, o teste IST é utilizado adotando-se um fator de correção. Este fator, designado por C , pode ser obtido a partir da elaboração do gráfico P em função de Q utilizando os dados apresentados na tabela anterior (Figura 15).

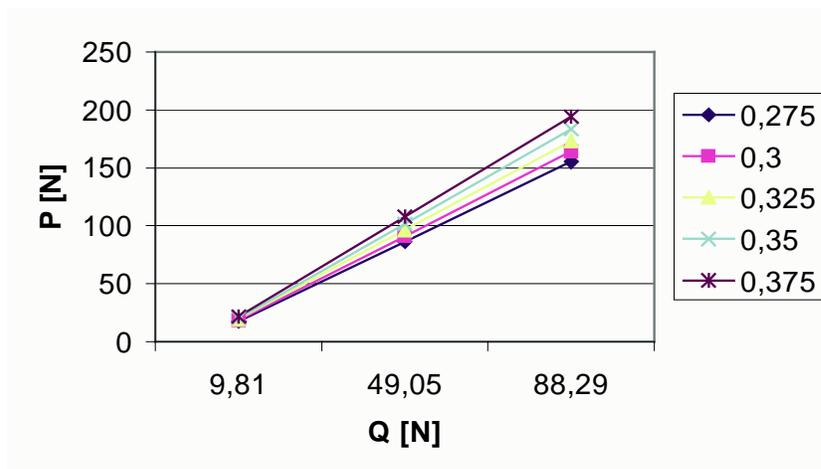


Figura 15 - P em função de Q.

Deste gráfico, pode-se escrever que $Tg(\theta)=P/Q$, sendo o ângulo θ marcado no sentido anti-horário a partir do eixo horizontal. Substituindo os valores de P, encontrados na Tabela 1, na Eq.(3.1), pode ser obtido a Eq.3.2, como segue:

$$\tau = \frac{QC}{ht} \quad (3.2)$$

sendo

$$C = \left(\frac{b - a}{a + b} \right) Tg \theta$$

Exemplo:

A variação deste fator de correção C, para $Q= 49,05N$, encontra-se no intervalo:

$$Tg\theta=87,106/49,05 = 1,77, \text{ para } a/b = 0,2875$$

$$Tg\theta=99,025/49,05 = 2,01, \text{ para } a/b = 0,3375$$

Portanto, para estas condições o fator de correção encontra-se no intervalo: $0,94 \leq C \leq 1,06$.

Normalmente, as deformações específicas são melhores avaliadas por meio da colagem de dois sensores de deformação – sensor ξ (strain gage), sendo um em cada face da amostra em posição oposta, orientados a 45° , sendo que outras formas de medição podem ser utilizadas. As leituras destas deformações são facilmente registradas, por meio da leitura do sinal elétrico em uma ponte de Wheatstone (1/2 ou ponte completa), convertendo o sinal elétrico em deformação mecânica. O registro destas deformações específicas ξ permite elaborar o gráfico τ em função de γ . A deformação angular γ é dada por:

$$\gamma = \left| \xi_{+45} \right| + \left| \xi_{-45} \right| \quad (3.3)$$

Portanto, o módulo de cisalhamento é obtido por meio do gráfico elaborado τ em função de γ pela inclinação da reta G/l (Figura 16).

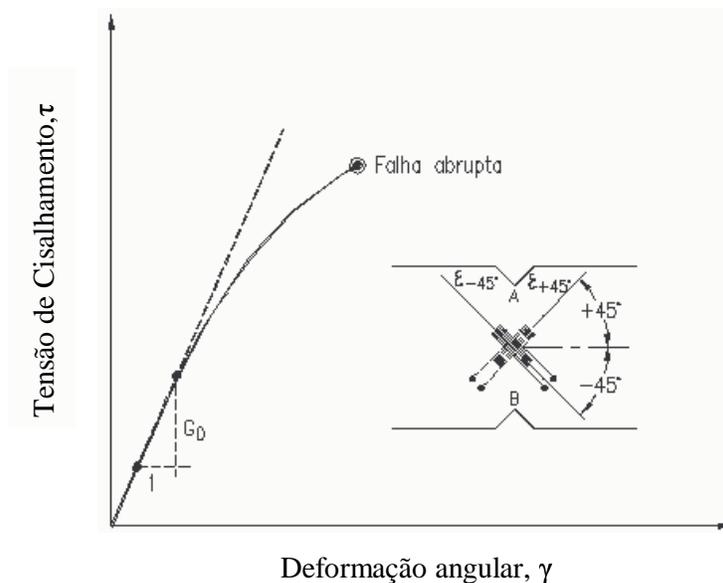


Figura 16 - τ em função de γ .

Assim,

$$G = \frac{Q}{\gamma ht} C \quad (3.4)$$

A este valor de G recomenda-se efetuar correções por meio de fatores que considera, por exemplo, a influência dos pontos de apoios das reações devido ao carregamento externo ou deslocamento imposto ao sistema. Uma vez que os pontos de apoio não ocorrem simetricamente na amostra em relação aos entalhes em V. Isto é, os pontos de apoio à direita do entalhe em V não são necessariamente simétricos à esquerda.

A tensão de cisalhamento entre os entalhes não é constante para as diferentes orientações e materiais avaliados. Devido a não uniformidade na distribuição de tensão foi adotado um fator de correção. Quanto maior a relação ortotrópica, menor será o fator de correção (HO et al., 1993).

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Inicialmente, foi realizado um ensaio de calibração, em uma viga de calibração, dos sinais dos sensores de deformação em ponte completa. Esta viga, com uma extremidade engastada e outra livre, é dotada de uma região central em que a deformação permanece constante ao longo da grade do sensor de deformação. As leituras dos sinais foram registrados em um transdutor de deformação - Instruments Division (Figura 17). A constante $E\xi_0$ foi avaliada para uma carga pré-estabelecida P_0 , por meio da equação:

$$E\xi_0 = cte = \frac{6P_0L}{bh^2} \quad (3.5)$$

Onde P_0L é o momento aplicado, L é a distância entre o ponto de aplicação da carga e a grade do sensor de deformação, b é a largura, h é a altura da viga e E é o módulo de Young.



Figura 17 - Transdutor de deformação.

A Figura 18 mostra a calibração efetuada antes das atividades de ensaios nas amostras do compósito. Realizada a calibração no transdutor de deformação e efetuada a colagem dos sensores de deformação, montados a 45° na superfície de cada amostra e utilizando uma montagem em ponte completa, como mostrado na Figura 19, o próximo passo foi realizar os ensaios nas amostras do compósito.



Figura 18 - Processo de calibração antes dos ensaios nas amostras do compósito.

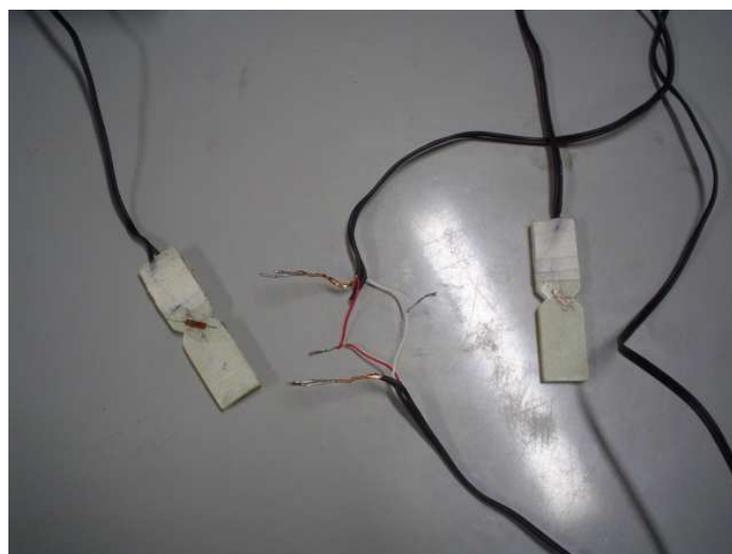


Figura 19 - Montagem da Ponte completa utilizando duas amostras.

A montagem dos sensores de deformação em ponte completa permitiu uma leitura do sinal na ponte de Wheatstone estável. Portanto, uma amostra fica submetida ao esforço de carregamento no dispositivo de ensaio e a outra auxilia na estabilidade da resposta.

Nessa fase preliminar as amostras foram ensaiadas pela aplicação de pequenas cargas, fazendo-se a leitura do sinal durante o carregamento e descarregamento, por meio de discos previamente aferidos. As Figuras 20 e 21 mostram a montagem da amostra no dispositivo para o Teste de Iosipescu submetida a uma carga equivalente a 9 discos de 1Kgf cada.



Figura 20 - Amostra no dispositivo para o Teste de Iosipescu.



Figura 21 - Amostra submetida ao esforço de carregamento.

Os ensaios de Iosipescu foram realizados com o transdutor de deformação calibrado e com o fator de ganho igual a 4,401, as leituras das deformações na ponte de Wheatstone foram efetuadas para cada adição de carga e descarga (alívio de carga) visualmente por simples anotações e em alguns casos por registros gráficos.

Foram utilizados 4 amostras com as seguintes dimensões $L=76,2\text{mm}$; $H=19,9\text{mm}$; $h=12,3\text{mm}$ (distância entre os entalhes); $t=5\text{mm}$ e um ângulo dos entalhes de 90° . As amostras foram numeradas e cortadas como mostra a Tabela 2. O conjunto de amostras A foi escolhido para caracterizar as propriedades mecânicas do compósito vidro/epoxi de 8 camadas.

Para este conjunto foi executada a seguinte atividade:

- Ensaios em condição de regime elástico;
- Ensaios em condições de ruptura.

Os ensaios em condições de regime elásticos visaram levantar gráficos que mostraram o comportamento das deformações específicas em função do tempo; deformação específica em função da tensão de cisalhamento; tensão de cisalhamento em função da deformação angular e módulo de cisalhamento em função da orientação adotada em relação ao entalhe em V. Os ensaios em condições de ruptura visou levantar os gráficos que mostraram o comportamento da força aplicada ao dispositivo de ensaio em função do movimento do prendedor móvel do dispositivo de teste Iosipescu; deformação específica em função do tempo e tensão de cisalhamento em função da orientação adotada em relação ao entalhe em V.

Tabela 2 - Numeração das amostras e orientação.

Numeração das amostras	Orientação
A1, B1 e C1	Orientação do urdume
A2, B2 e C2	Orientação da trama
A3, B3 e C3	45° a partir da orientação do urdume
A4, B4 e C4	45° a partir da orientação do trama

3.4 Equipamentos utilizados no Laboratório

Máquina Universal de Ensaios, EMIC com capacidade máxima de 30 KN com acionamento eletromecânico por motor de velocidade variável e as respostas e os gráficos dos ensaios foram obtidos pelo Programa TESC (versão 3.01) instalado em um PC (Figura A).

Características da Máquina:

- Velocidade de ensaio: 5 mm/min;
- Célula de carga: 1KN
- Interface com o operador: através de um pequeno teclado para operações simples e de um microcomputador para medição e execução dos ensaios.



Figura 22 - Equipamento utilizado para os ensaios nas amostras.

As amostras foram ensaiadas até a ruptura registrando a força aplicada em função do deslocamento do prendedor móvel do teste de Iosipescu. Os ensaios foram realizados utilizando os equipamentos: máquina universal de ensaios, transdutor de deformação, registrador de deformação específica em função do tempo e computador (Figura 23).



Figura 23 - Máquina Universal de Ensaios EMIC.

Capítulo 4

ANÁLISES DOS RESULTADOS

4.1 TESTE DE CISALHAMENTO NO PLANO

Ao realizar teste de cisalhamento no plano é recomendável utilizar o sistema de referência longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T) como esquematizado na Figura 24. Para o compósito fibra de vidro/epóxi de 8 camadas a referência longitudinal será adotada na direção de empilhamento das camadas. Nestas condições, recomenda-se utilizar o sistema de referência radial (R) e tangencial (T). Por exemplo, o módulo de cisalhamento é designado como: $G_{TR}^{0^{\circ}} = G_{RT}^{90^{\circ}}$ e $G_{RT}^{0^{\circ}} = G_{TR}^{90^{\circ}}$. Isto é, o módulo de cisalhamento vem acompanhado de dois índices subscritos R e T. O primeiro índice indica o sentido da aplicação da carga que causa o cisalhamento na amostra, enquanto, o segundo índice refere-se à carga aplicada que causa tração. O índice sobrescrito indica o ângulo marcado a partir da orientação do urdume.

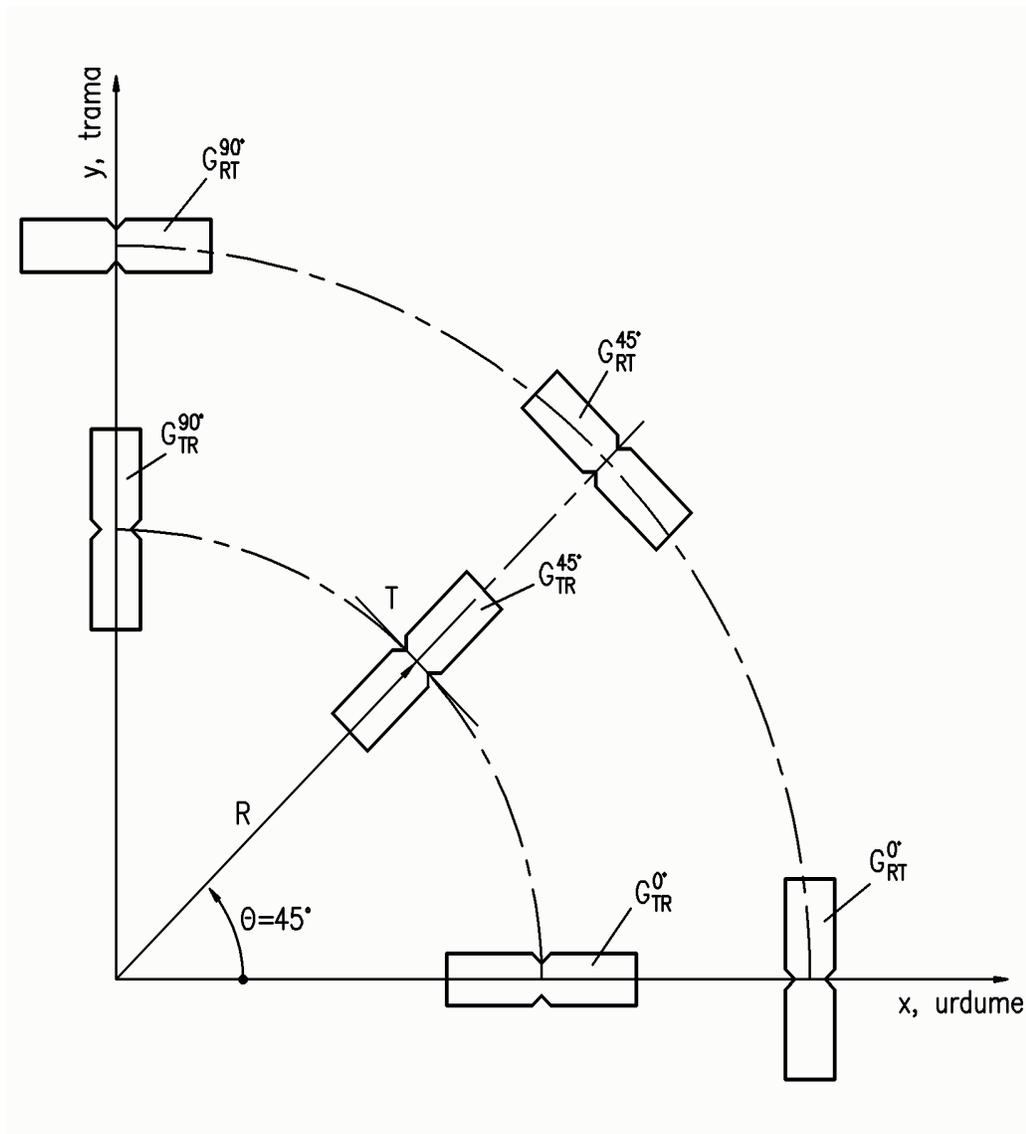


Figura 24 - Nomenclatura utilizada no conjunto de amostras A.

As amostras foram ensaiadas e apresentaram diferentes valores de deformação para de carga e descarga devido a suas configurações de corte e à disposição das fibras na posição urdume e trama. Foram realizados para cada amostra três leituras de carga e descarga em condição de regime elástico, bem como um carregamento até a ruptura para cada amostra. Os valores obtidos são apresentados nas tabelas no Apêndice A e a partir deles e da Eq.3.3, obteve-se os gráficos de tensão de cisalhamento em função da deformação angular e os valores de G , ambos valores para carga e descarga de cada amostra.

4.2 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS EM CONDIÇÕES DE REGIME ELÁSTICO

Antes de desenvolver as atividades de avaliação das propriedades mecânicas do material sob análise realizaram-se experimentos para verificar a resposta da montagem em ponte completa e colagem dos sensores. Foram efetuadas cargas e descargas que permitiram elaborar os gráficos de deformação específica em função do tempo para as quatro amostras preparadas. A partir dos resultados encontrados observou-se que as respostas das deformações específicas apresentaram um comportamento estável em função do tempo, conforme mostram as Figuras 25, 26, 27 e 28.

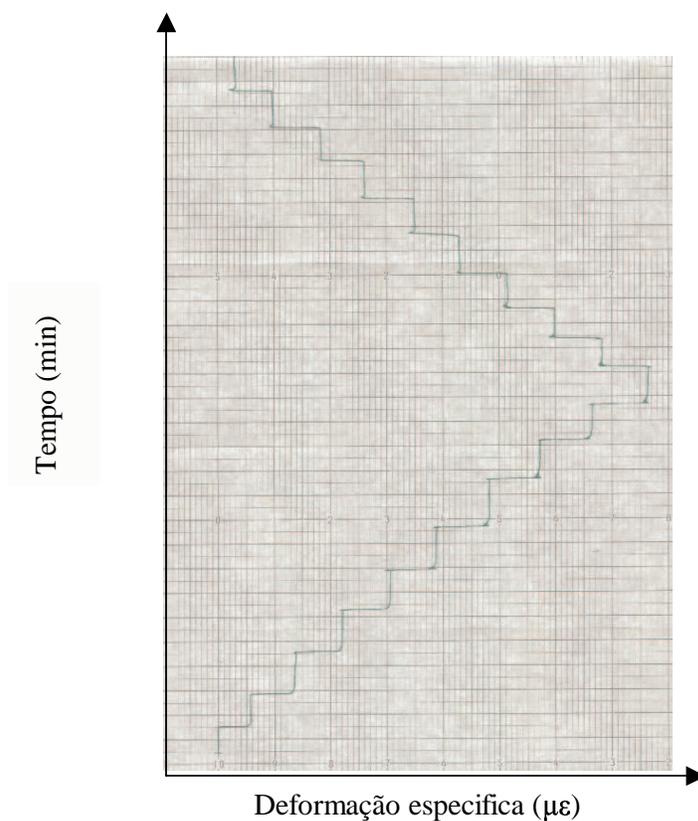


Figura 25 - Tempo em função da deformação específica para a amostra A1.

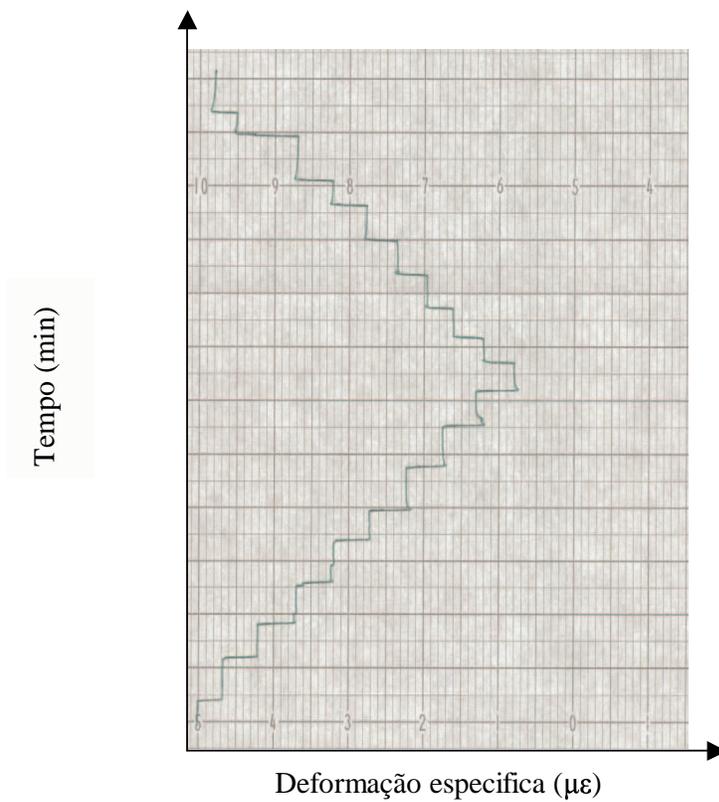


Figura 26 - Tempo em função da deformação específica para a amostra A2.

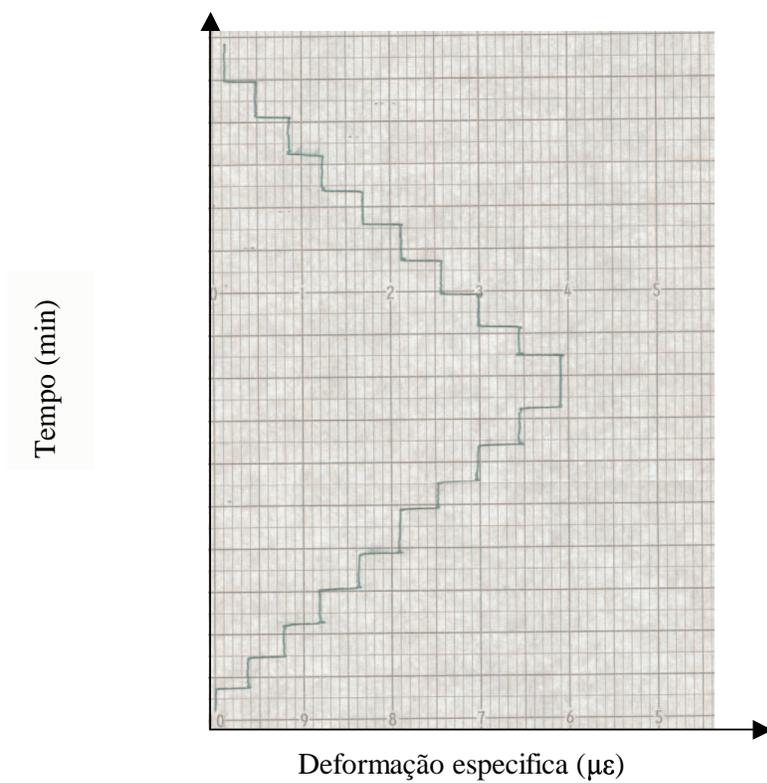


Figura 27 - Tempo em função da deformação específica para a amostra A3.

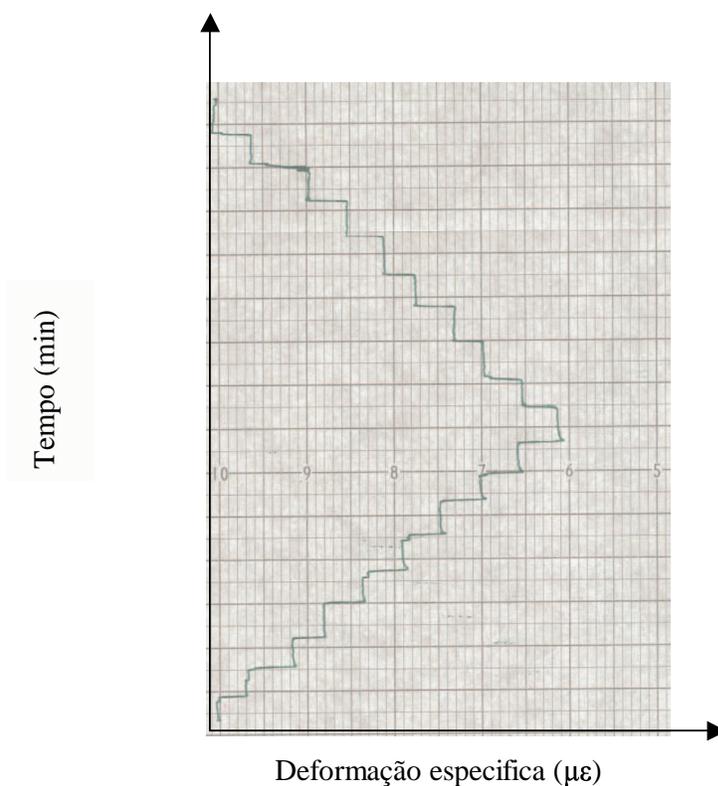


Figura 28 - Tempo em função da deformação específica para a amostra A4.

A resposta da deformação específica em função das condições de carga e descarga, no total de três seqüências de atividades experimentais, permitiram elaborar os gráficos razão das deformações específicas em função da tensão de cisalhamento (Figuras 29 a 32). Devido às amostras possuírem dois sensores de deformações colados em faces opostas e supondo que ocorreu nas amostras um correto carregamento, as duas tensões $\pm 45^\circ$ deveriam ser iguais em magnitude e opostas em sinal, ou seja as duas retas apresentadas nos gráficos abaixo estão relacionadas com as leituras das deformações nos sensores nas amostras para as condições de carga e descarga. Na elaboração dos gráficos, adotou-se como valor de referência $\epsilon_0 = 1.10^{-6}$ m/m.

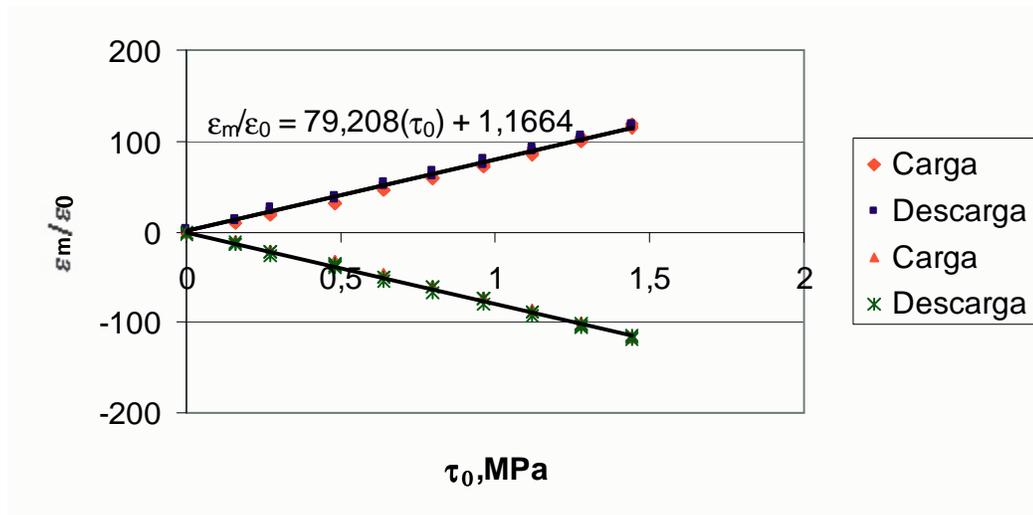


Figura 29 - Deformações específicas em função da tensão de cisalhamento para amostra A1.

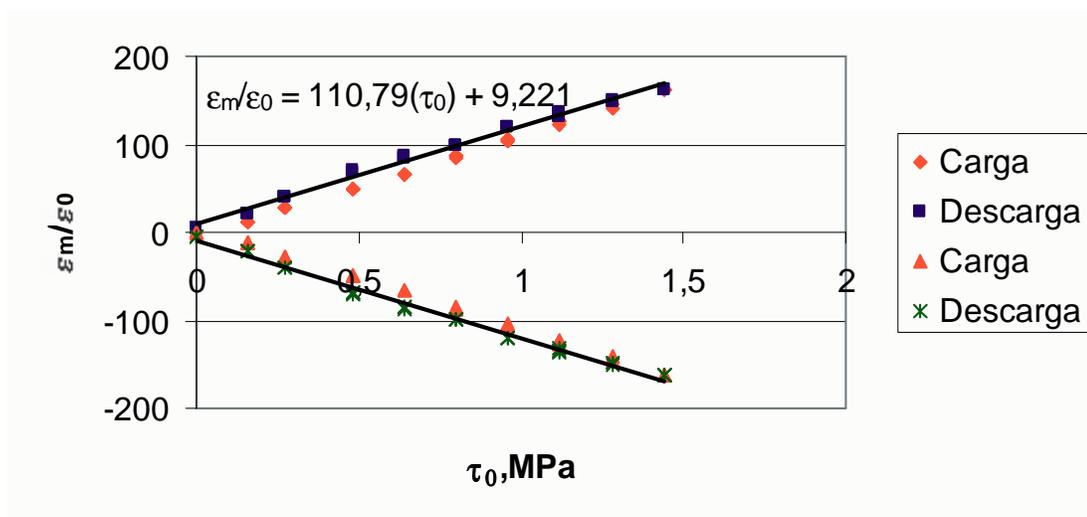


Figura 30 - Deformações específicas em função da tensão de cisalhamento para amostra A2.

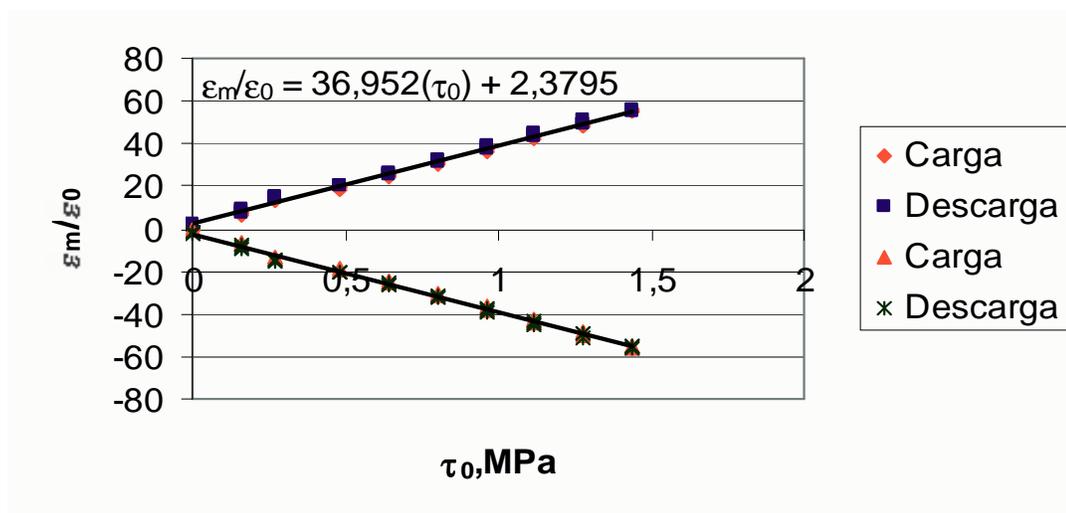


Figura 31 - Deformações específicas em função da tensão de cisalhamento para amostra A3.

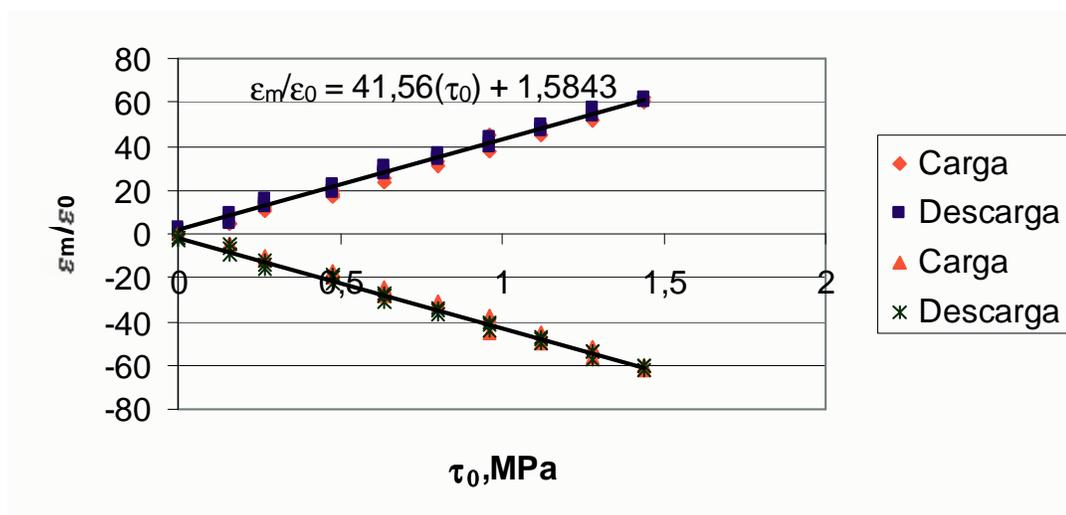


Figura 32 - Deformações específicas em função da tensão de cisalhamento para amostra A4.

As Figuras 33 a 40, obtidas utilizando os dados apresentados no Apêndice A, mostram o comportamento para as amostras em condições de regime elástico. Onde $\gamma_0=1^0$, sendo necessária sua conversão para radianos para obtenção do gráfico τ_0 em função da deformação angular. Os valores foram preparados em uma planilha e gerados para cada amostra dois gráficos distintos de carga e descarga.

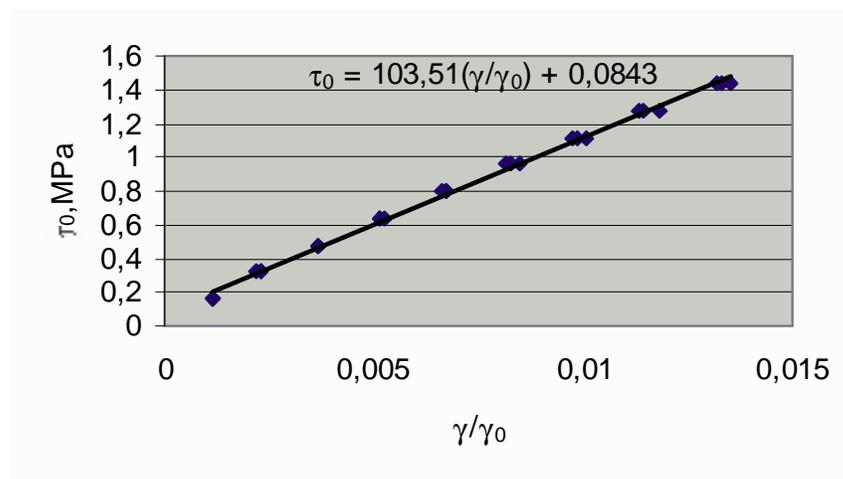


Figura 33 - τ_0 em função da deformação angular para carga na amostra A1.

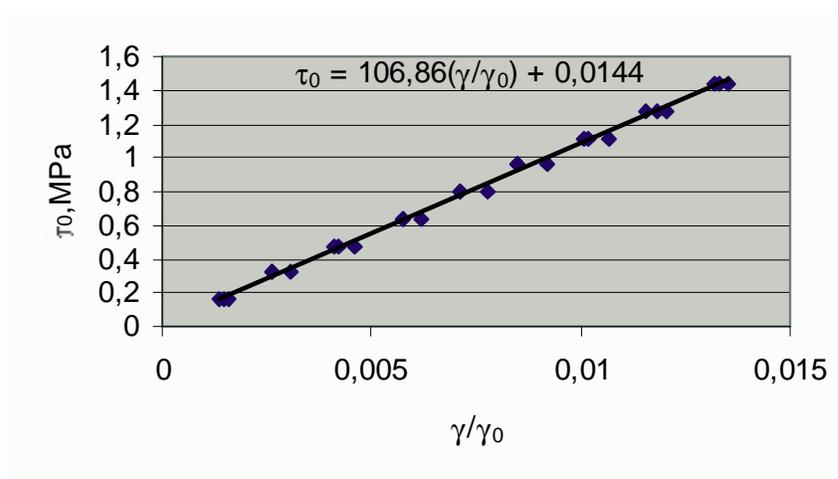


Figura 34 - τ_0 em função da deformação angular para descarga na amostra A1.

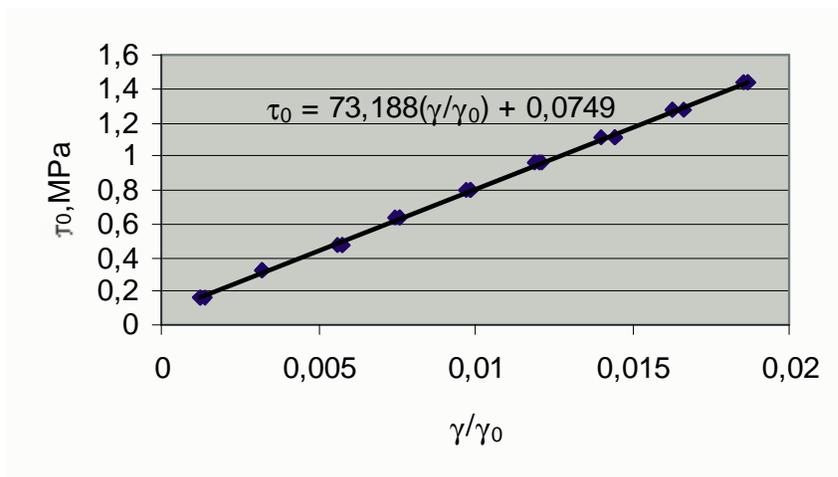


Figura 35 - τ_0 em função da deformação angular para carga na amostra A2.

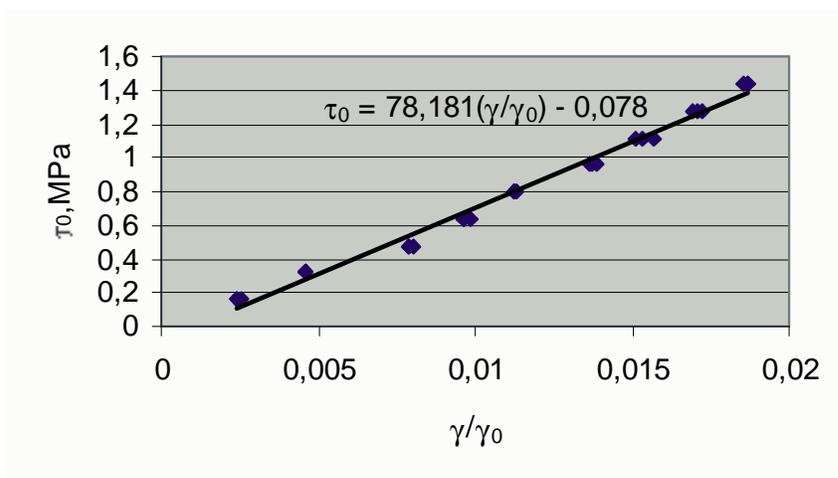


Figura 36 - τ_0 em função da deformação angular para descarga na amostra A2.

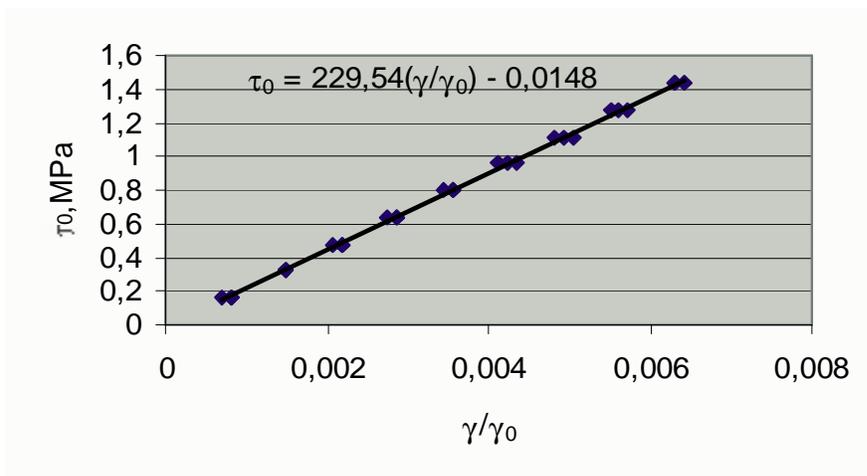


Figura 37 - τ_0 em função da deformação angular para carga na amostra A3.

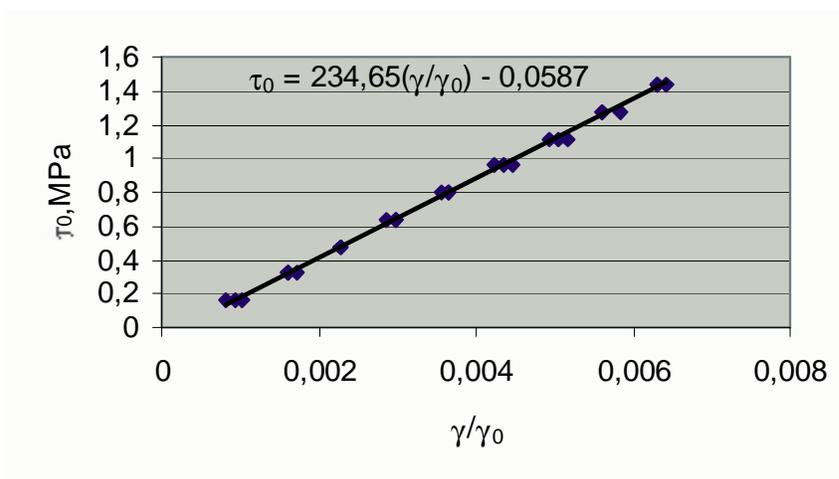


Figura 38 - τ_0 em função da deformação angular para descarga na amostra A3.

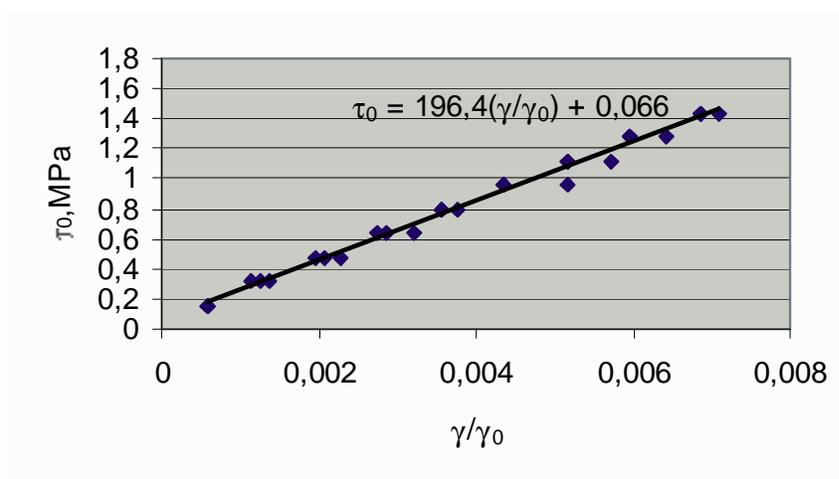


Figura 39 - τ_0 em função da deformação angular para carga na amostra A4.

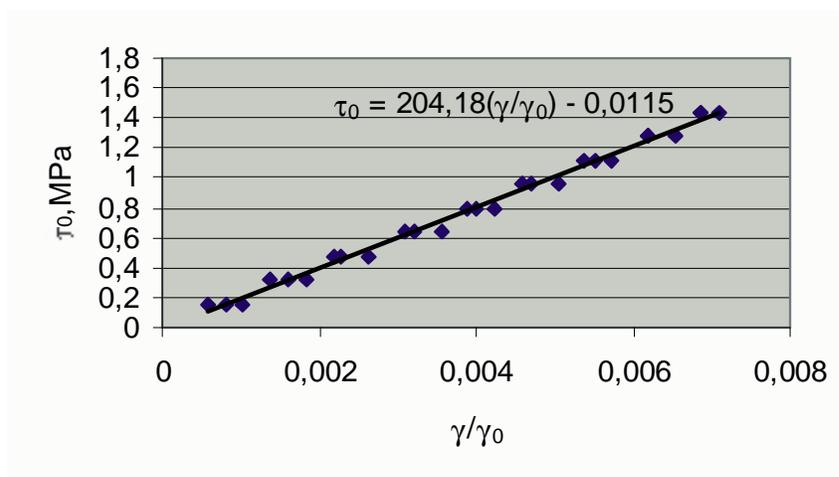


Figura 40 - τ_0 em função da deformação angular para descarga na amostra A4.

Na elaboração dos gráficos das Figuras 29 a 40, são apresentadas as equações para o cálculo da deformação específica em função da tensão de cisalhamento (Figuras 29 a 32) e tensões de cisalhamento em função da deformação angular (Figuras 33 a 40), visando mostrar os resíduos durante as atividades de carga e descarga.

Os cálculos para a obtenção do módulo de cisalhamento (G), encontram-se no Apêndice B, sendo que os valores encontrados são apresentados na Tabela 3. Como o compósito apresenta um baixo grau de ortotropia, fato verificado a partir da observação dos resultados, o fator de correção C foi utilizado no intervalo 0,94 e 1,06.

Tabela 3 – Módulo de cisalhamento sem e com o fator de correção em GPa.

CONDICÃO DE CARGA AMOSTRAS	SEM CORREÇÃO		COM CORREÇÃO	
	Carga	Descarga	Carga	Descarga
A1	5,93	6,12	5,574 – 6,285	5,753 – 6,487
A2	4,19	4,48	3,939 – 4,441	4,211 – 4,749
A3	13,15	14,44	12,361 – 13,939	12,636 – 14,246
A4	11,25	11,70	10,575 – 11,925	10,998 – 12,402

A Figura 41 apresenta a propriedade elástica do módulo de cisalhamento para o conjunto de amostras A. A linha tracejada mostra a curva de tendência das propriedades mecânicas do compósito. O gráfico mostra que o valor máximo do módulo de cisalhamento ocorre nas amostras onde o reforço encontra-se com um ângulo de 45°. Por outro lado, a amostra com ângulo de 0° apresenta um valor real encontrado de módulo de cisalhamento sem o fator de correção e com o fator de correção, superior à amostra de 90° e em ambas o valor real de módulo de cisalhamento sem o fator de correção e com o fator de correção é inferior aos das amostras com ângulos de 45°. Isto se deve ao grau de anisotropia do compósito, onde as propriedades elásticas do módulo de cisalhamento dependem fortemente da sucessão de empilhamento, combinação das fibras, grau de vazios e presenças de bolhas.

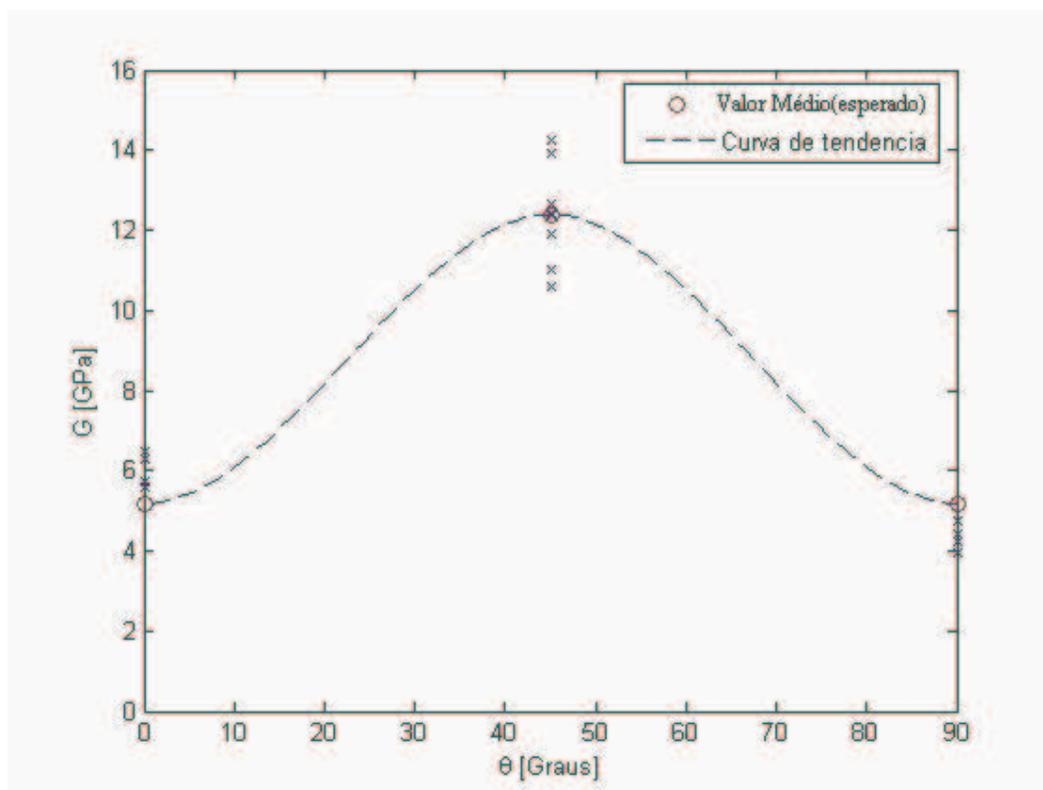


Figura 41 - Módulo de cisalhamento G_{RT} em função do ângulo θ .

4.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM CONDIÇÕES DE RUPTURA

Os ensaios realizados permitiram obter gráficos, designados como força em função do deslocamento (Figuras 42, 43, 44a e 45a), e os gráficos deformação específica em função do tempo (Figuras 44b e 45b).

A resposta da força em função do deslocamento para a amostra A1 permite observar que a amostra foi submetida a um esforço de tração igual ao valor de compressão, ou seja, as tensões principais são iguais (em módulo e com sinal trocado) a tensão de cisalhamento. Isto é, o gráfico apresenta para a força constante aplicada, grandes deslocamentos (região indicada pelas setas).

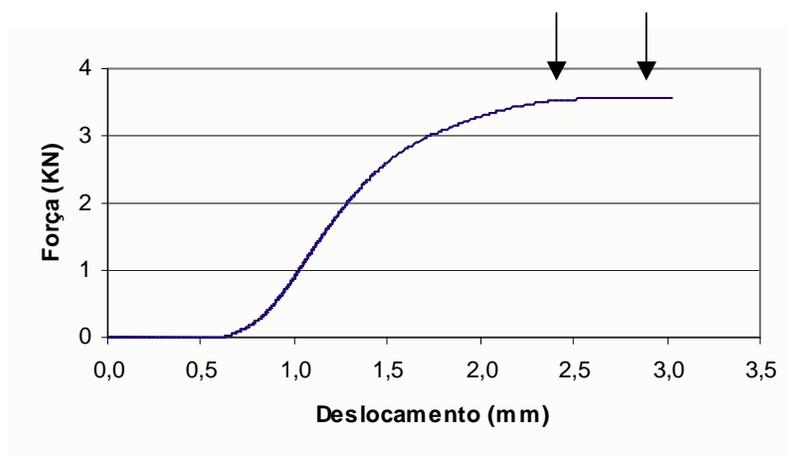


Figura 42 - Força em função do deslocamento para a amostra A1.

A resposta da força em função do deslocamento para a amostra A2 permite observar que possivelmente poderia ter ocorrido um crescimento de trincas, entre uma população de micro-trincas, ou um descolamento de camadas na amostra (ponto indicado pela seta). Mas para isso seria necessária a realização de microscopia na amostra.

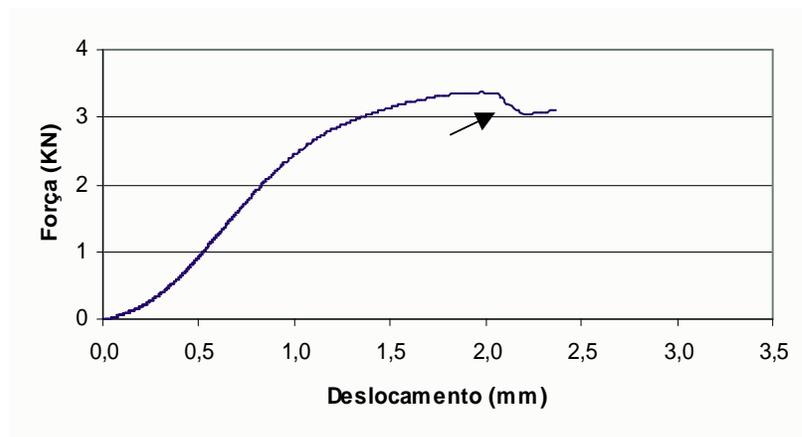


Figura 43 - Força em função do deslocamento para a amostra A2.

As respostas da força em função do deslocamento para as amostras A3 e A4 permitiram observar que possivelmente ocorreu com o aumento da carga aplicada uma propagação de trincas e isso causou uma instabilidade na resposta (pontos indicados pelas setas).

A partir do gráfico apresentado na Fig. 44a, pode-se notar que para a carga aplicada de 4140N ocorre a primeira instabilidade na resposta da amostra A3. Utilizando a resposta apresentada na Fig. 44b, a, deformação específica correspondente é da ordem de $2546,2 \mu\epsilon$. A tensão de cisalhamento, nesta condição, é de 66,73 MPa e utilizando as expressões apresentadas nos gráficos das Figuras 37 e 38 resultam nos valores de tensões de cisalhamento de 66,97 MPa (carga) e 68,41 MPa (descarga).

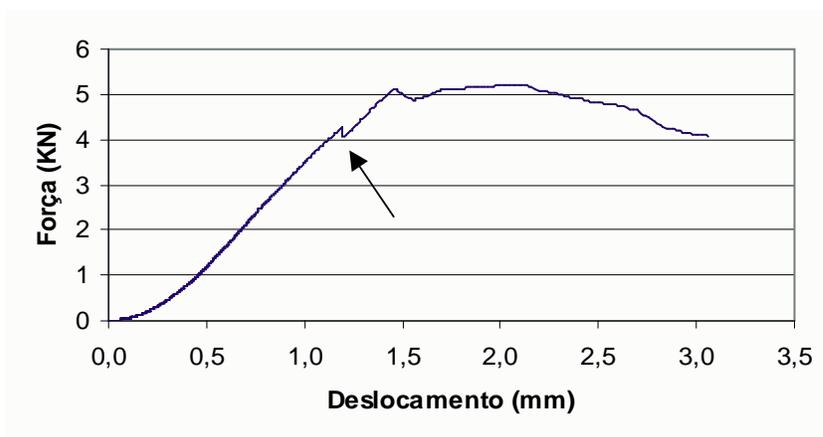


Figura 44a - Força em função do deslocamento para a amostra A3.



Figura 44b - Tempo em função da deformação específica para a amostra A3.

A partir do gráfico, apresentado na Figura 45a, pode-se notar que para a carga aplicada de 5070N ocorre a primeira instabilidade na resposta da amostra A4. Utilizando a resposta apresentada na Figura 44b a correspondente deformação específica é da ordem de 3501,4 $\mu\epsilon$. A tensão de cisalhamento nesta condição é de 82,44 MPa e utilizando as expressões apresentadas nos gráficos das Figuras 39 e 40 resultam nos valores de tensão de cisalhamento de 78,87 MPa (carga) e 81,90 MPa (descarga).

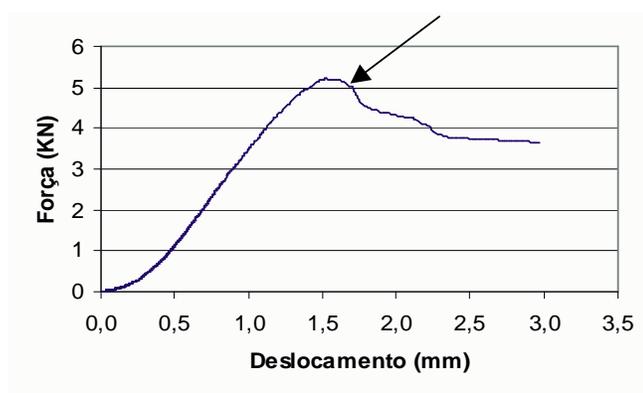


Figura 45a - Força em função do deslocamento para a amostra A4.

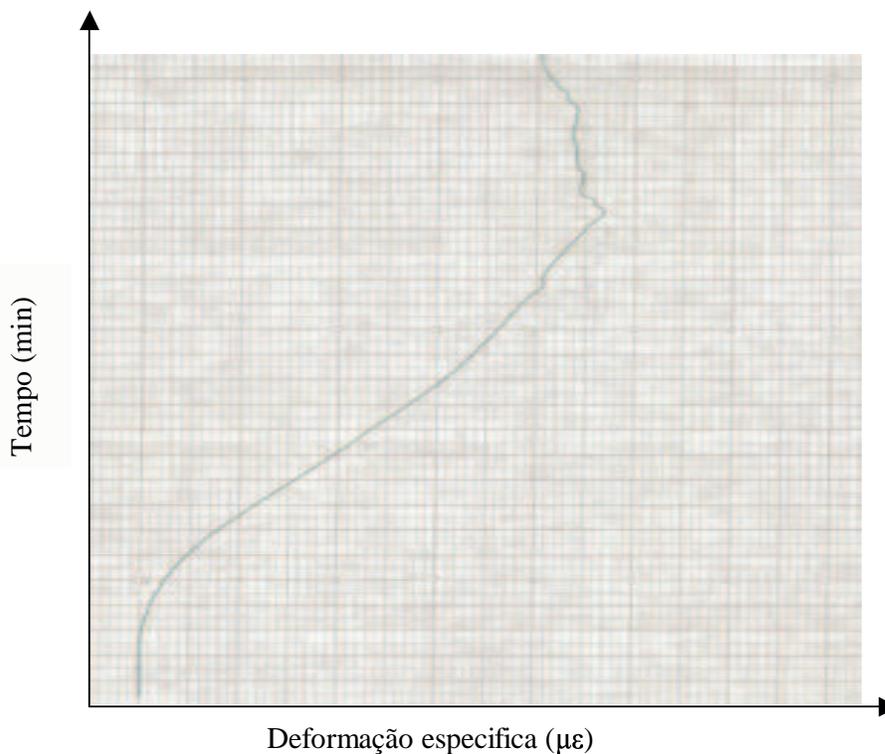


Figura 45b - Tempo em função da deformação específica para a amostra A4.

A Figura 46 mostra a variação da tensão de cisalhamento em função o ângulo de orientação das fibras até a ruptura das amostras A. Os valores para a tensão de cisalhamento para os diferentes ângulos de orientação das amostras são apresentados na Tabela 4. A linha tracejada mostra a curva de tendência da resposta da tensão de cisalhamento do compósito, esta curva de tendência foi feita utilizando o software MATLAB, que possui uma ferramenta, e que, permite obter uma curva de tendência com poucos pontos. O gráfico mostra que o valor máximo da tensão de cisalhamento ocorre nas amostras com ângulos de 45°, mas por outro lado à amostra com ângulo de 0° apresenta um valor superior à amostra de 90° e em ambas o valor da tensão de cisalhamento é inferior aos das amostras com ângulos de 45°. Como já comentado isto se deve ao grau de anisotropia do material.

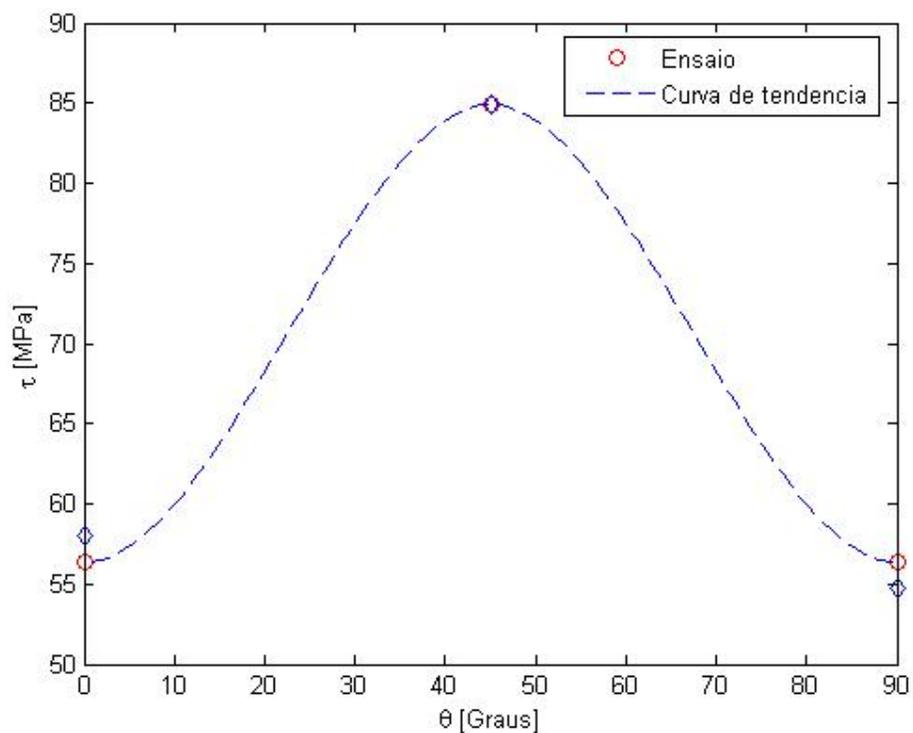


Figura 46 - Tensão de cisalhamento em condição não-elástica em função dos ângulos.

Tabela 4 – Tensão de cisalhamento para as diferentes orientações das amostras em MPa.

Ângulo \ Amostra	0°	45°	90°
A1	58,05	-	-
A2	-	-	54,7
A3	-	84,94	-
A4	-	84,84	-

A Tabela 5 mostra os valores médios da tensão e do módulo de cisalhamento para valores de referências. Os três primeiros dados são encontrados na literatura e o quarto refere-se a presente pesquisa. Nota-se uma diferença entre os valores para os diferentes tipos de

amostras selecionadas. Esse fato se deve a vários fatores relacionados a cada amostra como, orientação das fibras, resistência de cada compósito, fabricação, tamanho da amostra, etc.

Tabela 5 – Valores médios de τ e G encontrados na literatura e na presente pesquisa.

MATERIAL/ REFERÊNCIA	0° OU 90°		45°	
	τ , MPa	G, GPa	τ , MPa	G, GPa
Vidro/epóxi E (Daniel & Ishai, 1994)	89	3,8	-	-
Vidro/epóxi S (Daniel & Ishai, 1994)	69	4,5	-	-
Vidro/epóxi reforçado (Khashaba, 2003)	129	2,7	633	9,3
Vidro/epóxi com 8 camadas (presente pesquisa)	58	5,2	85	12,4

Quando comparados individualmente, os valores do módulo de cisalhamento para [0°], [45°] e [90°] não variam apreciavelmente uns dos outros, como já era de se esperar. Enquanto, os valores da tensão de cisalhamento com exceção do vidro/epóxi reforçado os valores apresentam um comportamento similar.

4.4 MODOS DE FALHA DO COMPÓSITO

Muitos materiais compósitos falham devido às tensões de cisalhamento, tal comportamento é devido ao cisalhamento no plano e ao cisalhamento interlaminar (ZHOU et. al, 1995). As amostras A1 e A2 falharam, provavelmente, devido à ocorrência de altas concentrações de tensão nos entalhes. Nota-se, ainda, que ocorreu o descolamento dos sensores de deformação da superfície da amostra supondo que, nas amostras A1 e A2 poderia ter ocorrido um cisalhamento puro (Figuras 47 e 49), mas para se afirmar tal condição, seria necessário realizar uma microscopia óptica nas amostras. Observa-se, ainda, que as faces de apoios das amostras no dispositivo de ensaio encontravam-se, praticamente, paralelas entre si, como pode ser observado utilizando-se as Figuras 48 e 50. Devido à elevada concentração de tensão na raiz do entalhe, foi ocasionada uma expansão da espessura nas faces dos entalhes da amostra A2, mostrando uma perda de aderência das camadas que compõem o compósito. Este fato pode estar relacionado (comentários referentes à página 57): crescimento de trinca ou descolamento de camadas na amostra, optou-se pela segunda observação.

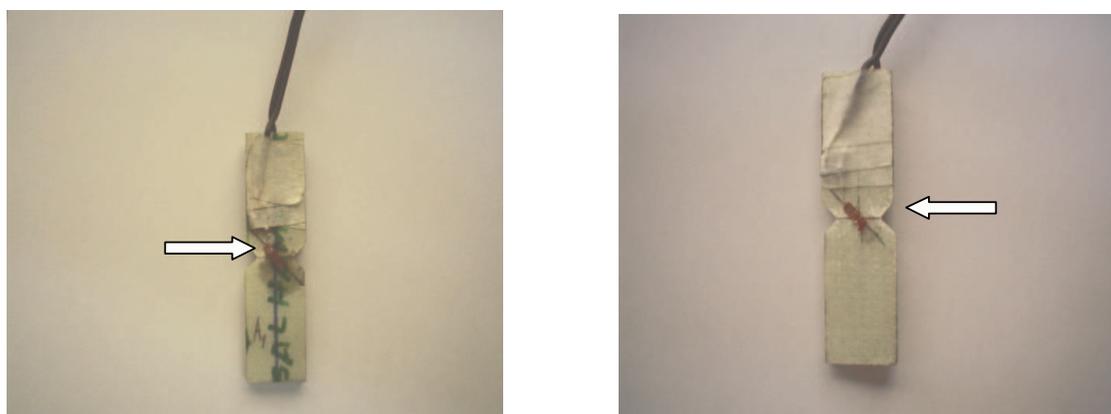


Figura 47 – Faces laterais da amostra A1.

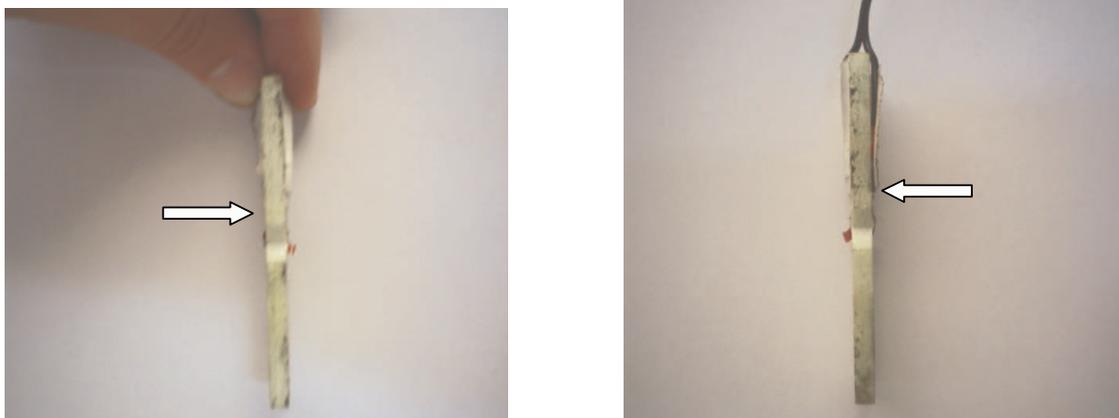


Figura 48 – Faces de apoio da amostra A1



Figura 49 – Faces laterais da amostra A2.

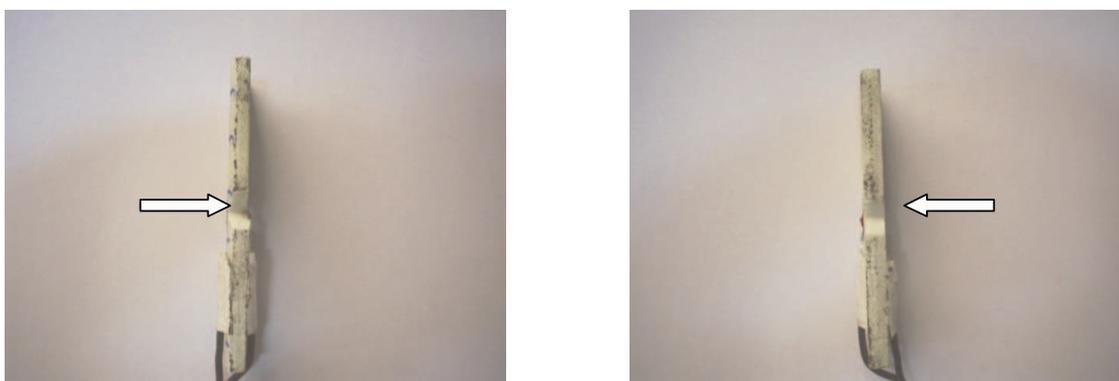


Figura 50 – Face de apoio da amostra A2

Nas amostras A3 e A4 ambas apresentaram comportamentos proporcionais na região elástica, entretanto, com o aumento da carga aplicada, em condição não elástica, ocorreu o aparecimento de micro trincas o que levou a falha das amostras por tensão de tração com o

aparecimento de trincas grandes e visíveis. Portanto, a carga aplicada foi reduzindo gradativamente em consequência da perda da integridade estrutural das mesmas.

Para as amostras A3 e A4, o crescimento das trincas ocorreu aproximadamente ao redor do ângulo de 45° da direção da carga aplicada, nos pontos de apoios das amostras, como indicado pelas setas nas Figuras 50 e 52. Observa-se, ainda, a ocorrência de tensões elevadas de esmagamento na amostra A3 em ambos os lados do entalhe na região em que atua a reação P_1 . Também, pode-se observar que, dependendo da face considerada neste estudo, o aparecimento de trinca na raiz do entalhe pode afetar a posição da tensão de esmagamento. Este fato mostra que no compósito vidro/epóxi de 8 camadas havia tensões residuais originadas durante o corte, responsáveis pelo aparecimento de uma curvatura na amostra A3. Este fato não ocorreu para a amostra A4.

Com o aumento da carga aplicada observa-se a presença de propagação de trincas ao redor da raiz dos entalhes e pontos de reações de cargas nas amostras na região de fixação das mesmas no prendedor móvel. Então, para esse estudo, adotou-se como orientação considerar para a avaliação da tensão de cisalhamento a máxima carga antes de ocorrer instabilidade nas amostras (Figuras 42, 43, 44a e 45a).

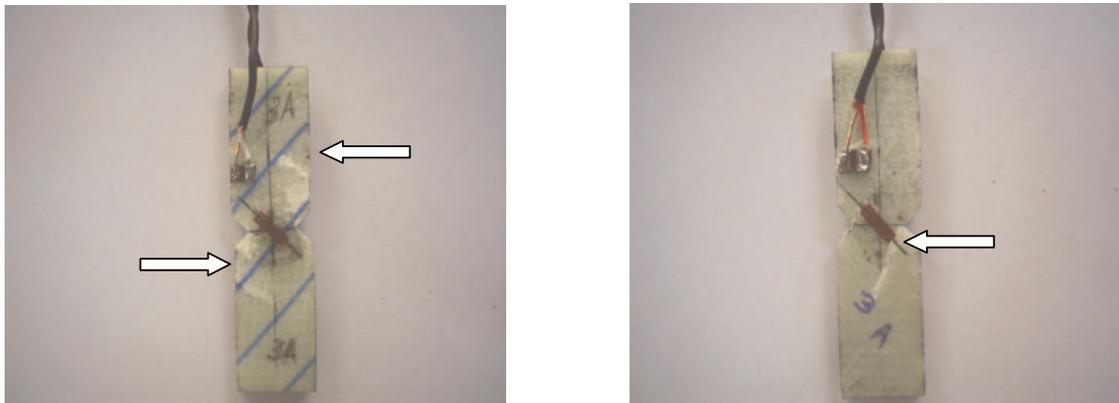


Figura 51 – Faces laterais da amostra A3.

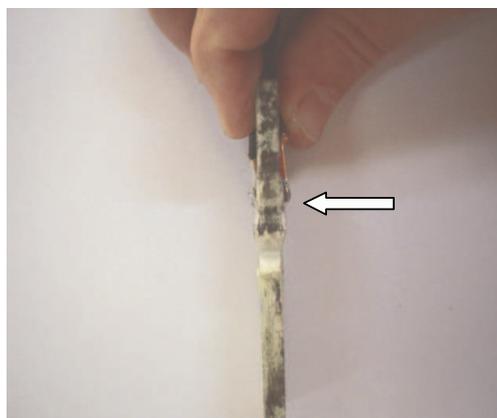
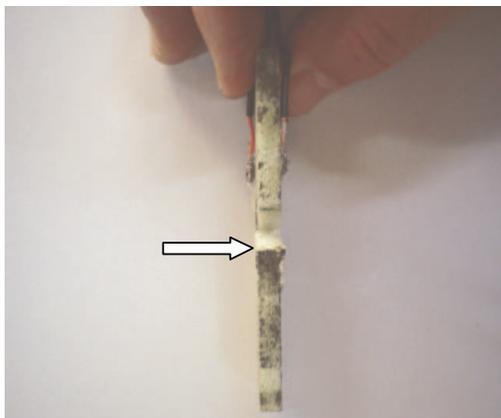


Figura 52 – Faces de apoio da amostra A3.

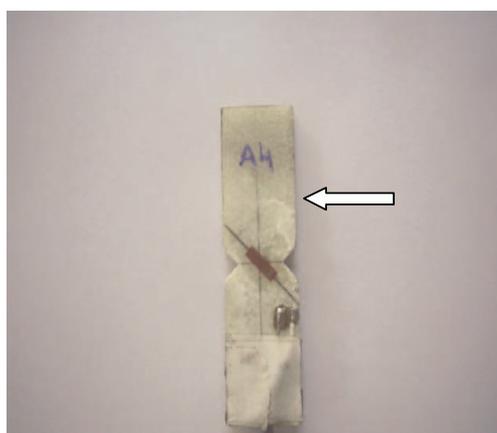
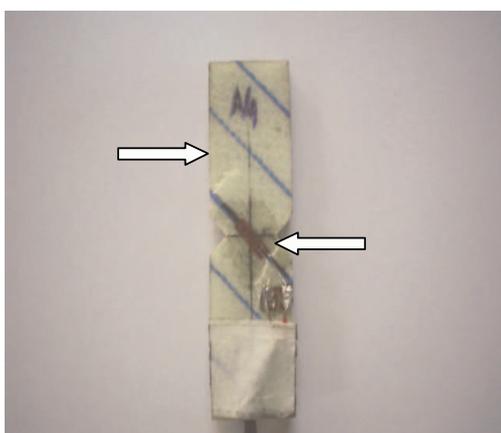


Figura 53 – Faces laterais da amostra A4.

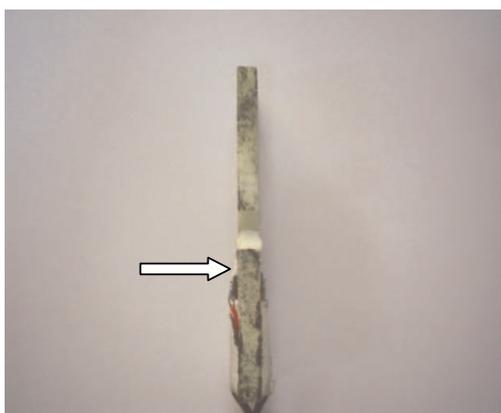


Figura 54 – Faces de apoio da amostra A4.

Estes modos de ocorrência de falhas afetaram as propriedades mecânicas do compósito vidro/epóxi de 8 camadas, podendo afirmar que este compósito apresenta um comportamento ortotrópico com baixo grau de ortotropia.

As fotos das amostras A1 e A2 (Figuras 47 e 49) ilustram o comportamento do compósito sob cisalhamento puro. A partir destas fotos foi observado que a fratura ocorreu de forma perpendicular à tensão normal positiva. Devido às imperfeições do compósito a fratura é provocada inicialmente pelo esforço máximo de tração e não pelo esforço de compressão. Essa é a base da teoria da tensão normal máxima, denominada de critério falha de Mohr. Assim, pode-se representar esse critério em um gráfico (parcial) de tensões principais, designadas por $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = -\tau$ e $\sigma_3 = 0$, como observado na Figura 55, onde σ designa o valor do limite de resistência à tração. Neste caso, a falha do compósito ocorre quando o valor da tensão principal positiva atinge um valor igual ou maior que o limite da resistência à tração. Em geral, a falha ocorre se o estado de tensão em um ponto é definido pela coordenada da tensão ($\tau ; -\tau$) localizada na linha de falha, ou, em um ponto externo da região segura.

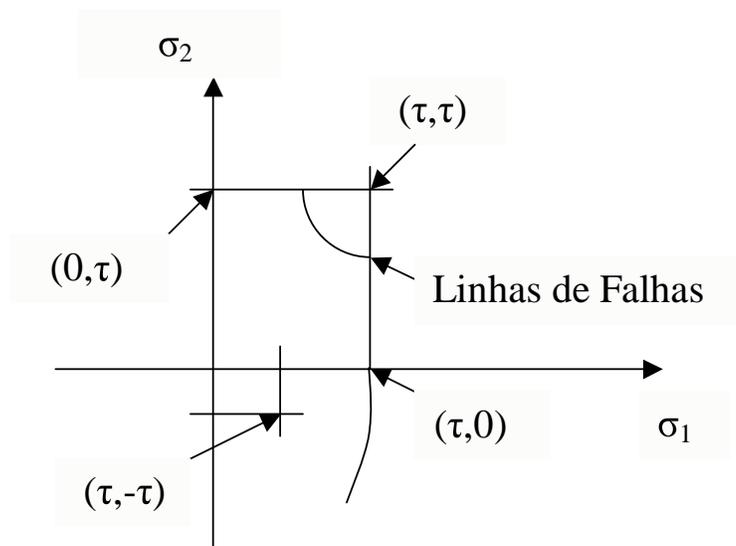


Figura 55 – Critério de falha de Mohr.

Finalizando esta discussão, salienta-se que para as amostras A3 e A4 as tensões de cisalhamento sofreram um acréscimo de tensões combinadas provocadas por torção e tensões residuais. Assim, o teste de Iosipescu pode ser utilizado como uma ferramenta no controle de qualidade após o processamento do compósito.

Capítulo 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos experimentalmente levam as seguintes conclusões:

- A seqüência de empilhamento e as diferentes orientações das fibras em amostras de materiais compósitos, bem como tensões residuais, levam a diferentes respostas dos dados experimentais. Assim, o teste de Iosipescu pode ser utilizado como uma ferramenta no controle de qualidade durante o processamento do compósito.

- Na posição do entalhe em V ocorreu uma acentuada concentração de tensões e uma descontinuidade do material devido ao processo de usinagem do entalhe facilitando a falha prematura da amostra.

- Com a perfeita colagem dos sensores nas amostras e com a montagem da ponte completa de Wheatstone, obteve-se uma leitura de sinal da deformação angular em função do

tempo bem estável e com pouca variação de sinal. Este fato encontra-se apresentado nos gráficos das Figuras 23-26.

- O maior valor da tensão de cisalhamento foi encontrado para as amostras A3 e A4, sendo estes de 84,94 e 84,84 MPa respectivamente. Nas amostras A1 e A2, o valor desta tensão foi inferior, 58,05 e 54,70 Mpa respectivamente. Isso, se deve ao grau de anisotropia do material.

- A falha das amostras A1 e A2, foram causados por cisalhamento puro ao longo das raízes do entalhe em V, onde o cisalhamento é paralelo à direção do carregamento. Nas amostras A3 e A4 as trincas nas raízes dos entalhes se propagaram ao longo das direções das fibras e, com o aumento da carga, um número maior de trincas foi observado ao redor do entalhe, ocasionando um esmagamento das amostras devido à concentração de tensão nos pontos de carregamento. Para ambas as amostras pode-se afirmar que estas foram submetidas a esforços de torção.

- As diferenças nos valores dos módulos de cisalhamento se devem ao grau de anisotropia do material, onde as propriedades elásticas do módulo de cisalhamento dependem fortemente da sucessão do empilhamento, combinação das fibras e teor de vazios. Apesar do material apresentar um baixo grau de ortotropia e o dispositivo de testes considerar o ângulo de apoio das amostras próximo à 5° (Figura 9) foi adotado um fator de correção que variou entre 0,94 e 1,06.

- Observa-se, ainda, que as faces de apoios das amostras A1 e A2 no dispositivo de ensaio eram praticamente paralelas. Devido à elevada concentração de tensão na raiz do entalhe, propiciou nas faces resultantes do processo de usinagem destes entalhes uma expansão da espessura da amostra, mostrando uma perda de aderência das camadas que compõem o compósito devido ao corte.

- Os valores médios da tensão e do módulo de cisalhamento para 0° , 45° e 90° apresentados na Tabela 5. Os três primeiros dados são encontrados na literatura e o quarto refere-se a presente pesquisa. Nota-se uma diferença dos valores para os diferentes tipos de amostras selecionadas, e isso se deve a vários fatores relacionados a cada amostra como, orientação das fibras, resistência de cada compósito, fabricação, tamanho da amostra, etc.

5.2 CONTRIBUIÇÕES

- O uso da viga com entalhe em V, com ângulo de 90°, para o teste de cisalhamento de Iosipescu para o compósito vidro/epoxi de 8 camadas mostrou ser uma ótima ferramenta para a determinação das propriedades mecânicas. Este método indica que as diferentes etapas de processamento de um compósito podem ser monitoradas por ensaios de relativa facilidade de execução, com pouco material de consumo.

- Os valores para o módulo de cisalhamento para as amostras A3 e A4 são, aproximadamente, simétricos em relação a linha de tendência dos resultados. Entretanto, para as amostras A1 e A2 esta observação não ocorreu. É fácil observar que para amostras laminadas a 0° os valores de G são superiores a curva de tendência sugerida, enquanto, para amostras laminadas a 90° os valores de G são inferiores a esta curva.

5.3 SUGESTÕES

Como sugestões para novos estudos, sugerimos:

- Estudar o comportamento do compósito laminado reforçado com vidro/epóxi de 8 camadas utilizando um ângulo de entalhe de 110°, aumentando o raio no fundo dos entalhes em V, para reduzir a concentração de tensão.

- Realizar ensaios para se obter as propriedades mecânicas à tração como, o valor último da resistência à tração (σ_{ut}), o módulo de elasticidade ou módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν).

- Utilizar os ensaios dinâmicos, vibrações transversais livres, para obter o módulo de armazenagem (E_a), de perda (E_p) e o fator de perda (δ), escrevendo o módulo dinâmico na forma: $E = E_a(1 + i\delta)$ e $\delta = E_p/E_a$.

- De posse de todas as propriedades mecânicas do material utilizar programas de elementos finitos ou elementos de contorno para encontrar o melhor intervalo do valor do fator de correção designado como fator C e o melhor ângulo do entalhe para elevar a resposta das propriedades mecânicas quanto ao grau de ortotropia do compósito. Em ambos os métodos numéricos, deve-se impor um deslocamento na amostra. Os gráficos apresentados nas Figuras 41-44 mostram valores de referência. Tais programas permitirão analisar a estrutura por meio da simulação de um modelo teórico computacional e ser capaz de realizar análises estruturais estáticas e dinâmicas, linear e não-linear.

- Utilizar o método dos elementos finitos para se obter soluções aproximadas de uma grande variedade de problemas físicos em projeto e análise de engenharia. Visto que a técnica de solução por elementos finitos é um conjunto de procedimentos baseados em métodos numéricos torna-se necessário estimar o grau de precisão para a solução desejada. Baseado nos resultados apresentados pode-se melhorar o modelo matemático ou otimizar estruturalmente o componente para um melhor desempenho.

- Realização de uma avaliação morfológica via microscopia óptica e eletrônica de varredura objetivando um estudo mais detalhado sobre os modos de falhas em compósitos submetidos a ensaios Iosipescu.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. R. M., MONTEIRO, S. N. (1999)**, “The iosipescu test method to evaluate the tensile strength of brittle materials”, *Polymer Testing*, 18, p.407-414.
- BANSAL, A., KUMOSA, M. (1998)**, “Analysis of double edge-cracked Iosipescu specimens under biaxial loads”, *Engineering Fracture Mechanics*, 59, p.89-100.
- BARNES, J. A., KUMOSA, M., HULL, D. (1986)**, “Theoretical and experimental evaluation of the Iosipescu shear test.” *Composites Science and Technology*, 28, p.251-268.
- BHATNAGAR, N., RAMAKRISHNAN, N., NAIK, N. K., KOMANDURI, R. (1995)**, “On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates”, *Tools Manufact.*, 35, p.701-716.
- BLASS, A. (1985)**, *Processamento de polímeros*. Florianópolis, Editora da UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina.
- CALLISTER JR., W. D. (1985)**, *Materials science and engineering*. New York, John Wiley & Sons.
- CARVALHO, J. (1996)**, *Computer integrated design optimization and manufacturing of filament wound parts*. Tese (Doutorado) – Faculty of Applied Sciences, PMA Division, K.U. Leuven.
- CHIANG, M. Y. M., HE, J. (2002)**, “An analytical assessment of using the Iosipescu shear test for hybrid composites”, *Composites: Part B*, 33, p.461-470.
- D5379/D5379M-93**, *Stander Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*, ASTM, 1993.

- DANIEL, I. M., ISHAI, O. (1994)**, “Experimental Methods for Characterization and Testing of Composite Materials”, Engineering Mechanics of composite Materials, Oxford University Press, 1994, pp. 34, 329-331.
- DIAS, J. C. (2004)**, “Resistência ao cisalhamento do compósito carbono reforçado com fibras de carbono/tecido tipo twill”, Revista Matéria, v.9, n.4, pp.263-270.
- HANDBOOK OF COMPOSITES (1982)**, London, Van Nostrand Reinhold Company.
- HAWONG, J. S., SHIN, D. C., BAEK, U. C. (2004)**, “Validation of pure shear test device using finite element method and experimental methods”, Engineering Fracture mechanics, 71, p.233-243.
- HE, J., CHIANG, M. Y. M., HUNSTON, D. L., HAN, C. C. (2002)**, “Application of the V-notch shear test for unidirectional hybrid composites”. J. Compos Mater; 36, p.2653-2666.
- HO, H, TSAI, M. Y., MORTON, J., FARLEY, G. L. (1993)**, “Numerical analysis of the iosipescu specimen for composite materials”. Composites Science and Technology, 46, p.115-128.
- HULL, D. (1981)**, An introduction to composite materials. London, Cambridge University Press.
- KHASHABA, U. A. (2003)**, “In-plane shear properties of cross-ply composite laminates with different off-axis angles”, Composite Structures.,65, p.167-177.
- LEE, S., MUNRO, M. (1990)**, “Evaluation of three in-plane shear test methods for advanced composite materials”, Composites, 21, p.495-502.
- LUCATO, D. (1991)**, “Contribuição ao projeto e validação de trem de pouso, tipo Wittman, em lâmina ortotrópica transversa de material compósito vidro e epóxi, para aeronaves enquadradas no F.A.R. PART-23. São Carlos. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- MATTHEUS, F. L., RAWLINGS, R. D. (1994)**, Composite Materials Engineering and Science. London, Chapman & Hall.
- MORTON, J., HO, H., TSAI, M. Y., FARLEY, G. L. (1992)**, “An evaluation of the Iosipescu specimen for composite materials shear property measurement”, Journal of Composite Materials, 26, p.708-50.
- PARDINI, L. C., (1998)**, “Preformas Tri-direcionais (3D) e Tetra-direcionais (4D) para Compósito Termo-estruturais”, NT-05/AMR/98, pág.21, Divisão de Materiais/IAE/AMR Maio/1998.
- PARDINI, L. C., PINA, S. R. O., RIBEIRO, M., DIAS, J. C. (2000)**, “Características de amortecimento de compósitos obtidos com tecidos de reforço híbrido carbono/vidro”, Universidade Federal de Itajubá.
- PIERRON, F., VAUTRIN, A. (1994)**, “Accurate comparative determination of the in-plane shear modulus of T300/914 by the Iosipescu and 45° off-axis tests”, Composite Science Technology, 52, p. 61-72.
- SHACKELFORD, J. F. (1996)**, Introduction to materials science for engineers. New York, John Wiley & Sons.
- SULLIVAN, J. L. (1988)**, “The use of Iosipescu specimens”, Experimental Mechanics, 28, p.326-8.
- SWANSON, S. R., MESSICK, M., TOOMBERS, G. R. (1985)**, “Comparison of torsion tube and Iosipescu in-plane shear test results for a carbon fibre-reinforced epoxy composite”, Composites,16, p.220-4.
- TARNOPOL`S, Y. M., KULAKOV, V. L., ARANAUTOV, A. K. (2000)**, “Measurements of shear characteristics of textile composites”, Computers & Structures, 76, p. 115-123.
- TSAI, S. W. (1986)**, Composites design. Dayton. United States Air Force Materials Laboratory. THINK COMPOSITES.

VINSON, J. R., SIERAKOWSKI, R .L. (1986), Behavior of structures composed of composite materials, Martins Nijhoff,Inc, Dordrecht, The Netherlands, 1986.

WALRATH, D. E., ADAMS, D. F. (1983), “The Iosipescu shear test as applied to composite materials”, *Experimental Mechanics*,23, p.105-110.

ZHOU, G., GREEN, E. R., MORRISON, C. (1995), “In-plane and interlaminar shear properties of glass/epoxy laminates”, *Composite Science Technology*,55, p.187-193.

Apêndice A

EQUIPAMENTOS E DADOS COLETADOS

A.1 Dados Coletados no Laboratório

As tabelas 1, 2, 3 e 4 mostram os dados coletados para os corpos de prova antes do ensaio na máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade de 3,0 KN com velocidade regulável. As amostras foram nomeadas como A1, A2, A3 e A4 e conforme a disposição das direções urdume e trama. Foram submetidas a carregamentos e descarregamentos com a utilização de discos previamente aferidos e obtidos os dados para carga e descarga, esses valores posteriormente serão utilizados para se obter os gráficos tensão em função da deformação ($\tau_0 \times \gamma/\gamma_0$) que encontram-se no Capítulo 4.

As amostras foram submetidas a 3 leituras de carregamento e descarregamento, para uma melhor análise da deformação em cada tipo de amostra devido as diferentes orientações das fibras.

Essas leituras são mostradas nas tabelas abaixo:

1ª Leitura

N	Carga	Descarga
9,81	10	12
16,62	19	23
29,43	32	37
39,24	45	50
49,05	59	62
58,86	71	74
68,67	85	88
78,48	100	101
88,29	116	116

2ª Leitura

N	Carga	Descarga
9,81	10	14
16,62	20	27
29,43	32	40
39,24	46	54
49,05	59	68
58,86	74	80
68,67	88	93
78,48	103	105
88,29	118	118

3ª Leitura

N	Carga	Descarga
9,81	10	13
16,62	20	23
29,43	32	36
39,24	45	50
49,05	58	62
58,86	72	74
68,67	86	89
78,48	99	103
88,29	115	115

Tabela 1 – Leituras de carregamento e descarregamento na amostra A1

1ª Leitura

N	Carga	Descarga
9,81	11	21
16,62	28	40
29,43	50	69
39,24	65	86
49,05	85	99
58,86	104	119
68,67	126	132
78,48	142	148
88,29	162	162

2ª Leitura

N	Carga	Descarga
9,81	11	21
16,62	28	40
29,43	49	70
39,24	66	84
49,05	86	98
58,86	105	121
68,67	126	134
78,48	145	149
88,29	163	163

3ª Leitura

N	Carga	Descarga
9,81	12	22
16,62	28	40
29,43	50	69
39,24	66	84
49,05	86	98
58,86	106	120
68,67	122	137
78,48	142	150
88,29	163	163

Tabela 2 – Leituras de carregamento e descarregamento na amostra A2

1ª Leitura			2ª Leitura			3ª Leitura		
N	Carga	Descarga	N	Carga	Descarga	N	Carga	Descarga
9,81	6	7	9,81	7	9	9,81	7	8
16,62	13	14	16,62	13	15	16,62	13	14
29,43	19	20	29,43	18	20	29,43	19	20
39,24	25	26	39,24	24	25	39,24	25	26
49,05	31	32	49,05	30	31	49,05	31	32
58,86	38	39	58,86	36	37	58,86	37	38
68,67	44	45	68,67	42	43	68,67	43	44
78,48	50	51	78,48	48	49	78,48	49	49
88,29	56	56	88,29	55	55	88,29	55	55

Tabela 3 – Leituras de carregamento e descarregamento na amostra A3

1ª Leitura			2ª Leitura			3ª Leitura		
N	Carga	Descarga	N	Carga	Descarga	N	Carga	Descarga
9,81	5	9	9,81	5	5	9,81	5	7
16,62	12	16	16,62	10	14	16,62	11	12
29,43	20	23	29,43	17	19	29,43	18	20
39,24	28	31	39,24	24	27	39,24	25	28
49,05	33	37	49,05	31	34	49,05	31	35
58,86	45	44	58,86	38	40	58,86	38	41
68,67	50	50	68,67	45	47	68,67	45	48
78,48	56	57	78,48	52	54	78,48	52	54
88,29	62	62	88,29	60	60	88,29	60	60

Tabela 4 – Leituras de carregamento e descarregamento na amostra A4

Apêndice B

B.1 Cálculos para obtenção dos valores do módulo de elasticidade

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A1: Carga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,01 \rightarrow 103,51(0,01)+0,0843 \rightarrow \tau_0=1,1194\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,005 \rightarrow 103,51(0,005)+0,0843 \rightarrow \tau_0=0,60185\text{MPa}$$

$$G_{TR}^{00} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{1,1194 - 0,60185}{(0,01 - 0,005) \cdot 1,7453 \cdot 10^{-2}} C = \frac{0,51755 \cdot 10^6}{0,000087265} C = 5,93C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $5,574 \text{ GPa} \leq G_{TR}^{00} \leq 6,285 \text{ GPa}$.

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A1: Descarga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,01 \rightarrow 106,86(0,01)+0,0144 \rightarrow \tau_0=1,083\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,005 \rightarrow 106,86(0,005)+0,0144 \rightarrow \tau_0=0,5487\text{MPa}$$

$$G_{TR}^{00} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{0,5343 \cdot 10^6}{0,000087265} C = 6,12C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $5,753 \text{ GPa} \leq G_{TR}^{00} \leq 6,487 \text{ GPa}$.

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A2: Carga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,015 \rightarrow 73,188(0,015)+0,0749 \rightarrow \tau_0=1,17272\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,005 \rightarrow 73,188(0,005)+0,0749 \rightarrow \tau_0=0,44084\text{MPa}$$

$$G_{RT}^{0^0} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{0,73188 \cdot 10^6}{0,00017453} C = 4,19C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $3,939 \text{ GPa} \leq G_{RT}^{0^0} \leq 4,441 \text{ GPa}$.

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A2: Descarga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,015 \rightarrow 78,181(0,015)-0,078 \rightarrow \tau_0=1,094715\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,005 \rightarrow 78,181(0,005)-0,078 \rightarrow \tau_0=0,312905\text{MPa}$$

$$G_{RT}^{0^0} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{0,78181 \cdot 10^6}{0,00017453} C = 4,48C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $4,211 \text{ GPa} \leq G_{RT}^{0^0} \leq 4,749 \text{ GPa}$.

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A3: Carga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,006 \rightarrow 229,54(0,006)-0,0148 \rightarrow \tau_0=1,36244\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,002 \rightarrow 229,54(0,002)-0,0148 \rightarrow \tau_0=0,44428\text{MPa}$$

$$G_{RT}^{45^0} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{0,91816 \cdot 10^6}{0,000069812} C = 13,15C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $12,361 \text{ GPa} \leq G_{RT}^{45^0} \leq 13,939 \text{ GPa}$.

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A3: Descarga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,006 \rightarrow 234,65(0,006)-0,0587 \rightarrow \tau_0=1,3492\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,002 \rightarrow 234,65(0,002)-0,0587 \rightarrow \tau_0=0,4106\text{MPa}$$

$$G_{RT}^{45^0} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{0,9386 \cdot 10^6}{0,000069812} C = 13,44C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $12,636 \text{ GPa} \leq G_{RT}^{45^0} \leq 14,246 \text{ GPa}$.

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A4: Carga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,006 \rightarrow 196,4(0,006)+0,066 \rightarrow \tau_0=1,2444\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,002 \rightarrow 196,4(0,002)+0,066 \rightarrow \tau_0=0,4588\text{MPa}$$

$$G_{TR}^{45^0} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{0,7856 \cdot 10^6}{0,000069812} C = 11,25C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $10,575 \text{ GPa} \leq G_{TR}^{45^0} \leq 11,925 \text{ GPa}$.

-Cálculo do módulo de cisalhamento da amostra A4: Descarga

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,006 \rightarrow 204,18(0,006)+0,0115 \rightarrow \tau_0=1,23658\text{MPa}$$

$$P/\gamma/\gamma_0 = 0,002 \rightarrow 204,18(0,002)+0,0115 \rightarrow \tau_0=0,41986\text{MPa}$$

$$G_{TR}^{45^0} = \frac{\tau_0}{\gamma} C = \frac{0,81672 \cdot 10^6}{0,000069812} C = 11,70C \text{ GPa}$$

Assim, o módulo de cisalhamento resulta: $10,998 \text{ GPa} \leq G_{TR}^{45^0} \leq 12,402 \text{ GPa}$.